

## ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ СМЕСИ ИОНОВ МЕДИ И ЦИНКА ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В ПРИСУТСТВИИ $\text{NH}_3$

Аунг Пьяе, О.Ю. Колесникова, Хейн Ту Аунг, **V.A. Kolesnikov**

Аунг Пьяе\*, Ольга Юрьевна Колесникова, Хейн Ту Аунг, Владимир Александрович Колесников  
Кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, Российская Федерация, 125047  
E-mail: aungpyae05@gmail.com\*, tsukanovaolga11@gmail.com, spiritlay@yandex.ru, kolesnikov-tnv-i-ep@yandex.ru

*Представлен анализ электрофлотационного извлечения смеси ионов меди и цинка из растворов, приготовленных смешением исходных растворов сульфата меди и гидроксида аммония. Показано, что извлечение ионов меди из аммиакатных систем протекает недостаточно эффективно в широком диапазоне pH. Установлено, что при увеличении концентрации аммония, в несколько раз превышающей содержание меди, остаточная концентрация меди после электрофлотации увеличивается до 5 – 10 мг/л. Отмечено отрицательное влияние аммиачной среды на скорость электрофлотационного процесса и степень очистки. Показано влияние лиганда  $\text{NH}_3$  на снижение размера частицы в 8 - 10 раз по сравнению с раствором  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Установлено, что введение в систему с комплексообразователем (Cu, Zn) катионного ПАВ приводит к смещению  $\xi$ -потенциала в положительную сторону. При 10-кратном избытке лиганда по отношению к комплексообразователям катионов Cu, Zn степень электрофлотационного извлечения смеси труднорастворимых соединений меди и цинка снижается. Введение катионного флокулянта Zetag-8160 существенно интенсифицирует процесс электрофлотации (в 2 - 3 раза). Показано положительное влияние на процесс фильтрационного извлечения смеси труднорастворимых соединений меди и цинка присутствие в системе катионного ПАВ и флокулянта. Установлено, что в присутствии в системе 10-кратного избытка лиганда ( $\text{NH}_3$ ), процесс электрофлотационного извлечения дисперсной фазы гидроксидов меди и цинка протекает наиболее эффективно с катионным флокулянтом Zetag-8160, достигая высоких степеней извлечения.*

**Ключевые слова:** электрофлотация, ионы меди и цинка, ПАВ, флокулянты, сточные вода

## ELECTROFLOTATION EXTRACTION OF A MIXTURE OF COPPER AND ZINC IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS IN THE PRESENCE OF $\text{NH}_3$

Aung Pyae, O.Yu. Kolesnikova, Hein Thu Aung, **V.A. Kolesnikov**

Aung Pyae\*, Olga Yu. Kolesnikova, Hein Thu Aung, Vladimir A. Kolesnikov  
Department of Technology of Inorganic Substances and Electrochemical Processes, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia  
E-mail: aungpyae05@gmail.com\*, tsukanovaolga11@gmail.com, spiritlay@yandex.ru, kolesnikov-tnv-i-ep@yandex.ru

*The analysis of electroflotation extraction of a mixture of copper and zinc ions from solutions prepared by mixing the initial solutions of copper sulfate and ammonium hydroxide is presented. It is shown that the extraction of copper ions from ammonia systems is not efficient enough in a wide pH range. It was found that with an increase in the ammonium concentration several times higher than the copper content, the residual copper concentration after electroflotation increases to 5-10 mg/l. The negative influence of the ammonia environment on the rate of the electroflotation process and the degree of purification was noted. The effect of the  $\text{NH}_3$  ligand on a decrease in the particle size by a factor of 8 - 10 compared to the  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution was shown. It*

*was found that the introduction of a cationic surfactant into the system with a complexing agent (Cu, Zn) leads to a shift of the  $\xi$ -potential in the positive direction. With a 10-fold excess of the ligand with respect to the complexing agents of Cu and Zn cations, the degree of electroflotation extraction of a mixture of poorly soluble copper and zinc compounds decreases. The introduction of the cationic flocculant Zetag-8160 significantly intensifies the electroflotation process (2-3 times). The presence of a cationic surfactant and a flocculant in the system has been shown to have a positive effect on the process of filtration extraction of a mixture of hardly soluble copper and zinc compounds. It was found that in the presence of a 10-fold excess of ligand ( $\text{NH}_3$ ) in the system, the process of electroflotation extraction of the dispersed phase of copper and zinc hydroxides proceeds most efficiently with the cationic flocculant Zetag-8160, reaching high recovery rates.*

**Key words:** electroflotation, copper and zinc ions, surfactants, flocculants, wastewater

**Для цитирования:**

Аунг Пьяе, Колесникова О.Ю., Хейн Ту Аунг, Колесников В.А. Электрофлотационное извлечение смеси ионов меди и цинка из водных растворов в присутствии  $\text{NH}_3$ . *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 119–124

**For citation:**

Aung Pyae, Kolesnikova O.Yu., Hein Thu Aung, Kolesnikov V.A. Electroflotation extraction of a mixture of copper and zinc ions from aqueous solutions in the presence of  $\text{NH}_3$ . *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 119–124

## ВВЕДЕНИЕ

В современном гальванохимическом производстве для получения покрытий требуемого качества и заданных характеристик широко применяются комплексные электролиты, в первую очередь для процессов меднения и цинкования, также получения сплавов Zn-Ni, Cu-Zn, в состав которых входят различные комплексообразователи – лиганды ЭДТА, аммоний, цианид, тартрат и пирофосфат – ионы и др [1-3].

Очистка сточных вод от комплексных ионов меди и цинка представляет собой сложную научно-техническую задачу, к решению которой можно приступить, зная закономерности перехода комплексных ионов в дисперсное состояние и последующего их отделения в виде дисперсной фазы [4,5].

Известны различные способы отделения дисперсной фазы – осаждение, фильтрация, флотация и электрофлотация. В последние годы в России [6-13] и зарубежом [13-22] широкое распространение для очистки сточных вод сложного состава получил метод электрофлотации.

Известно, что значительное влияние на растворимость соединения оказывает состав раствора, при этом важнейшим параметром является природа и концентрация лигандов (L) и комплексообразователя (Me).

В то же время расчеты показывают, что при некотором соотношении компонентов  $[\text{Me}]:[\text{L}]$  и определенном значении pH среды или при разрушении лиганда в растворе образуются труднорастворимые соединения типа  $\text{Me}(\text{OH})_n$  и  $\text{MeX}_n$ , кото-

рые в определенных условиях могут быть извлечены из раствора.

При проведении лабораторных исследований используют два подхода: первый включает нахождение области максимального перехода металла в дисперсное состояние за счет увеличения соотношения  $\text{Me}:\text{L}$  и смещения величины pH до 9 – 11, второй связан с разрушением лигандов с помощью окислителей, добавляемых в раствор или генерируемых электролизом. Предварительный эксперимент показал, что первый подход может быть реализован как для меди, так и для цинка практически для всех систем, кроме цианида. Второй, наоборот, наиболее эффективен для систем Zn-CN, Cu-CN, так как связан с дополнительным обезвреживанием токсичного лиганда и извлечением металлов в виде гидроксидов [7]. Установлено, что в аммиакатных системах в щелочной области pH почти вся медь находится в основном в виде гидроксида, аммиакатный комплекс более слабый, чем ранее описанные тартратные и этилендиаминовые [10].

Цинк образует комплексы в аммиакатных системах, однако комплексы не очень прочные, и в щелочных растворах при pH = 9–11 ионы цинка образуют труднорастворимые гидроксиды. Однако было замечено, что в избытке ионов  $\text{NH}_4^+$  электрофлотационный процесс протекает несколько хуже, чем для обычных растворов, содержащих  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  и другие соли [8].

Целью данной работы является исследование процесса электрофлотационного (ЭФ) извлечения смеси гидроксидов меди и цинка из щелочных аммиачных растворов.

Основные задачи исследования:

- определить влияние межфазных характеристик дисперсной фазы ( $\xi$ -потенциал, размер частиц) на ЭФ процесс;

- установить влияние катионных ПАВ и флокулянтов на степень извлечения смеси гидроксидов меди и цинка в аммиачных растворах.

Исследуемый объект: «H<sub>2</sub>O – гидроксиды Cu, Zn – раствор NH<sub>3</sub>» реально встречается при очистке сточных вод гальванохимического производства.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрофлотационный процесс проводили по методике, опубликованной в статьях [8-10] на лабораторной непроточной установке.

Эффективность электрофлотационного процесса оценивали степенью извлечения  $\alpha$  (%) и рассчитывали по формуле:

$$\alpha = (C_{\text{исх}} - C_{\text{кон}}) / C_{\text{исх}} \cdot 100\%,$$

где  $C_{\text{исх}}$ ,  $C_{\text{кон}}$  – соответственно исходная и конечная концентрация ионов металлов в водной среде, которую определяли атомно-адсорбционным методом в ЦКП им. Д.М. Менделеева на приборе «КВАНТ-АФА» по стандартизированной методике.

Для исследований, характеризующих физико-химические свойства (электрокинетический потенциал и гидродинамический радиус) потенциала, использовали лазерные анализаторы диапазона «Photocor Compact» и «Analysette NanoTec» на кафедре технологии неорганических веществ и электрохимических процессов.

В качестве добавок исследовались катионные ПАВ КатаПАВ, СептаПАВ и катионный флокулянт марки Zetag-8160.

Катионный ПАВ КатаПАВ - Алкилдиметилбензиламмоний хлорид, жидкость беловато-желтого цвета, полностью растворим в воде. Входит в класс четвертичных аммонийных соединений.

Катионный ПАВ СептаПАВ - Дидецилдиметиламмоний хлорид, жидкость беловато-прозрачного цвета, растворим в этиленгликоле и воде. Входит в класс четвертичных аммонийных соединений.

Катионный флокулянт Zetag-8160 (основа - полиакриламид) - имеет высокую молекулярную массу. В кислой или щелочной среде является электроположительным, что способствует эффективному взаимодействию в сточных водах с отрицательно заряженными осадками.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований электрофлотационного процесса извлечения дисперсной фазы гидроксидов меди и цинка из водно-аммиачных растворов в присутствии избытка лиганда.

Предварительно проведенные исследования, выполненные в группе профессора В.А. Колесникова в период с 2005 по 2015 гг. по однокомпонентным системам, показали, что электрофлотационный процесс извлечения меди из водного раствора, содержащего CuSO<sub>4</sub> – 100 мг/л и NH<sub>3</sub> – 500 мг/л, pH = 10, возможен с эффективностью 70 – 80%. Степень извлечения гидроксида цинка несколько выше 70 – 85%.

Аммиачный комплекс для меди более устойчив, чем для цинка. Максимальные величины констант устойчивости (pK) составляют для [Cu(NH<sub>3</sub>)<sub>6</sub>]<sup>+2</sup> – 12,03, для [Zn(NH<sub>3</sub>)<sub>6</sub>]<sup>+2</sup> – 9,3.

Установлено, что в пенный продукт, формирующийся в ходе ЭФ процесса, не устойчив, степень извлечения снижается во время электрофлотации на 10 – 20%. Снижение степени извлечения связано с малым размером частиц дисперсной фазы и отрицательным  $\xi$ -потенциалом.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований, характеризующих физико-химические свойства (электрокинетический потенциал и гидродинамический радиус) частиц меди в присутствии лиганда NH<sub>3</sub>.

**Таблица 1**

**Электрокинетический потенциал и гидродинамический радиус частиц Cu<sup>2+</sup> в присутствии лиганда NH<sub>3</sub>**  
**Table 1. Electrokinetic potential and hydrodynamic radius of Cu<sup>2+</sup> particles in the presence of ligand NH<sub>3</sub>**

| Система          |  | Заряд, мВ | Размер, мкм | Доля, %  |
|------------------|--|-----------|-------------|----------|
| Cu <sup>2+</sup> | -  | -2        | 0,09<br>61  | 2<br>98  |
| Cu <sup>2+</sup> | + NH <sub>3</sub><br>250 мг/л                    | -12       | 6           | 100      |
| Cu <sup>2+</sup> | + NH <sub>3</sub><br>500 мг/л                    | -20       | 7,6<br>13   | 70<br>30 |
| Cu <sup>2+</sup> | + NH <sub>3</sub><br>250 мг/л<br>+ Септа-<br>ПАВ | -5        | 1,5<br>24   | 15<br>85 |
| Cu <sup>2+</sup> | + NH <sub>3</sub><br>500 мг/л<br>+ Септа-<br>ПАВ | -7        | 0,9<br>17   | 30<br>70 |

Примечание: C(Cu<sup>2+</sup>) = 50 мг/л; C(ПАВ) = 5 мг/л; pH = 10  
Note: C(Cu<sup>2+</sup>) = 50 mg/l; C(Surfactant) = 5 mg/l; pH = 10

Наличие в системе лиганда NH<sub>3</sub> в 5-ти кратном избытке по отношению к катионам меди (II) приводит к смещению электрокинетического потенциала в более отрицательную область, с -2 до -12 мВ. При увеличении избытка лиганда до соотношения Me:L 1:10 отрицательная величина потенциала увеличивается и составляет -20 мВ.

Установлено, что комплексообразователь  $\text{NH}_3^+$  снижает размер частиц при соотношении 1:5 в 10 раз, при этом частицы размером менее 0,1 мкм в системе не обнаружены. Увеличение концентрации комплексообразователя (Cu, Zn) способствует незначительному укрупнению частиц. Выявлено наличие двух групп размеров частиц.

Введение в систему с лигандом  $\text{NH}_3$  катионного ПАВ СептаПАВ приводит к смещению потенциала в положительную область. При соотношении Me:L 1:5 отмечено укрупнение частиц с 6 до 24 мкм, однако обнаружены и более мелкие частицы размером 1,5 мкм.

Экспериментально установлено, что для смеси гидроксидов цинка и меди при  $\text{pH} = 10$  и концентрации  $\text{NH}_3 - 500$  мг/л средний размер частиц дисперсной фазы составляет 7-9 мкм, заряд дисперсной фазы отрицательный, величина  $\xi$ -потенциала  $-8 \pm 1$  мВ.

Для смеси трех гидроксидов, цинка, меди и никеля, при  $\text{pH} = 10$  средний размер частиц в присутствии  $\text{NH}_3 - 500$  мг/л  $- 5-6$  мкм, электрокинетический потенциал  $-6$  мВ. Рассмотрим результаты ЭФ процесса извлечения смеси труднорастворимых соединений Cu и Zn в щелочном водно-аммиачном растворе. Экспериментальные данные представлены на рисунке.

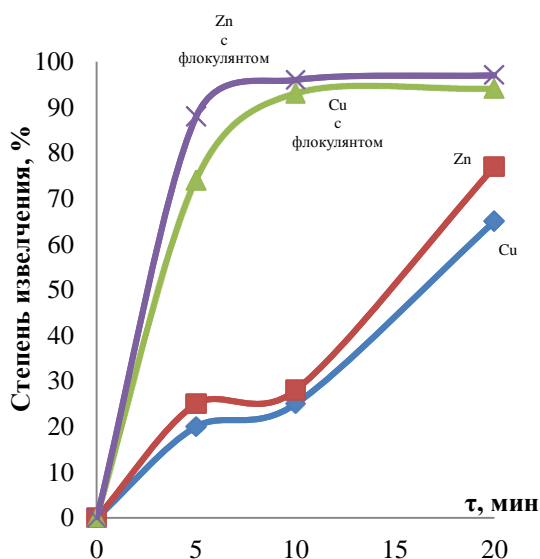


Рис. Влияние катионного флокулянта Zetag-8160 на электрофлотационного извлечения гидроксидов меди и цинка из двух-компонентных систем.  $C(\text{Cu}^{2+}) = 50$  мг/л,  $C(\text{Zn}^{2+}) = 50$  мг/л,  $C(\text{NH}_4\text{OH}) = 500$  мг/л,  $C(\text{Org.}) = 5$  мг/л;  $J_v = 0,4$  А/л,  $\text{pH} = 10$   
 Fig. The influence of Zetag-8160 cationic flocculant on electroflotation extraction of copper and zinc hydroxides from two-component systems.  $C(\text{Cu}^{2+}) = 50$  mg/l,  $C(\text{Zn}^{2+}) = 50$  mg/l,  $C(\text{NH}_4\text{OH}) = 500$  mg/l,  $C(\text{Org.}) = 5$  mg/l;  $J_v = 0.4$  A/l,  $\text{pH} = 10$

По экспериментальным данным, представленным на рисунке, видно, что процесс электрофлотационного извлечения смеси труднорастворимых соединений меди и цинка в присутствии 10-ти кратного избытка лиганда  $\text{NH}_3$  протекает с низкой интенсивностью. В первые 5 мин степень извлечения не превышает 25%. Последующее увеличение времени до 20 мин приводит к извлечению меди на 60% и цинка на 70%. В то же время, введение катионного флокулянта Zetag-8160 существенно интенсифицирует процесс электрофлотации. Уже в первые 5 мин степень извлечения смеси труднорастворимых соединений меди и цинка увеличивается до 70% и 90%, и по истечении 10 мин процесс выходит на максимум, степень извлечения находится на уровне 90% и далее практически не изменяется.

Остаточная концентрация Cu, Zn остается на достаточно высоком уровне, примерно 1 мг/л, что значительно больше ПДК, и связано с наличием комплексных соединений, которые электрофлотационно не извлекаются. Полученные данные подтверждает и фильтрация, которая не позволяет извлечь растворимые компоненты.

Рассмотрим влияние кислотности среды на эффективность отделения дисперсной фазы смеси труднорастворимых соединений меди и цинка в присутствии катионных добавок фильтрационным методом, который косвенно характеризует количество в системе дисперсной фазы.

Изучено влияние катионных добавок на фильтрационное извлечение смеси гидроксидов Cu и Zn после 20 мин электрофлотации. Показано, что с увеличением значения  $\text{pH}$  степень извлечения меди возрастает с 50% при  $\text{pH}=8$  до максимального значения 75% при  $\text{pH}=10$  и далее начинает снижаться, что объясняется растворением гидроксидного осадка при  $\text{pH}=11$ . Труднорастворимые соединения цинка в то же время извлекаются более эффективно: максимальное значение степени извлечения наблюдается при  $\text{pH}=9$ , и составляет 92%.

Введение катионного ПАВ СептаПАВ и флокулянта Zetag-8160 оказало положительное влияние на процесс фильтрационного извлечения дисперсной фазы смеси гидроксида меди и цинка.

Введение катионного ПАВ КатаПАВ оказало негативное влияние на извлечение меди, степень извлечения снижалась в диапазоне  $\text{pH} 9-10$  до значения 22-29%, цинк извлекается достаточно эффективно, степень извлечения составляет 85-93%.

Установлено, что исследуемые добавки (катионный флокулянт и ПАВ) способствуют расширению области  $\text{pH}$  эффективного ЭФ извлечения смеси гидроксидов меди и цинка в аммиачных растворах. Экспериментальные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Степень электрофлотационного извлечения гидроксидов меди и цинка в зависимости от pH в присутствии лиганда NH<sub>3</sub>

Table 2. Degree of electroflotation extraction of copper and zinc hydroxides depending on pH in the presence of ligand NH<sub>3</sub>

| pH |    | Степень извлечения, α, % |                  |                   |                            |
|----|----|--------------------------|------------------|-------------------|----------------------------|
|    |    | Без ПАВ                  | С ПАВ (Ката-ПАВ) | С ПАВ (Септа-ПАВ) | С Флокулянтом (Zetag-8160) |
| 8  | Cu | 44                       | 17               | 81                | 94                         |
|    | Zn | 59                       | 38               | 64                | 90                         |
| 9  | Cu | 70                       | 17               | 74                | 93                         |
|    | Zn | 65                       | 75               | 68                | 89                         |
| 10 | Cu | 65                       | 21               | 79                | 90                         |
|    | Zn | 75                       | 90               | 85                | 97                         |
| 11 | Cu | 53                       | 52               | 34                | 58                         |
|    | Zn | 84                       | 87               | 34                | 60                         |

Примечание: C(Cu<sup>2+</sup>) = 50 мг/л, C(Zn<sup>2+</sup>) = 50 мг/л, C(NH<sub>4</sub>OH) = 500 мг/л, C(Org.) = 5 мг/л, J<sub>v</sub> = 0,4 А/л; τ = 20 мин  
 Note: C(Cu<sup>2+</sup>) = 50 mg/l, C(Zn<sup>2+</sup>) = 50 mg/l and C(NH<sub>4</sub>OH) = 500 mg/l, C(Org.) = 5 mg/l, J<sub>v</sub> = 0.4 A/l; τ = 20 min

Установлено, что процесс электрофлотационного извлечения смеси гидроксидов меди и цинка в присутствии 10-ти кратного избытка комплексообразователя NH<sub>4</sub>OH наиболее эффективно протекает с катионным флокулянтом Zetag-8160, который помимо того, что способствует увеличе-

нию степени извлечения до 90-97%, также и расширяет эффективную область pH с 8 до 11, что крайне важно с практической точки зрения при разработке технологий водоочистки. Основной эффект достигается за счет увеличения размера частиц и снижения величины ξ-потенциала.

## ВЫВОДЫ

Получены экспериментальные данные по электрофлотационному и фильтрационному извлечению дисперсной фазы смеси ионов Cu и Zn в присутствии лиганда NH<sub>3</sub>, показывает, что процесс протекает недостаточно эффективно. Основная причина малый размер частиц дисперсной фазы (7 - 8 мкм) и высокие отрицательные ξ-потенциалы (отрицательно заряженные частицы), что ведёт к затруднению формирования флотокомплекса ΣMe(OH)<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>.

Степень извлечения гидроксидов меди и цинка резко возрастает при добавлении в систему с NH<sub>4</sub>OH катионного ПАВ СептаПАВ в диапазоне pH 9-11 и составляет 93 - 97%. При введении в систему катионного флокулянта Zetag-8160 в диапазоне pH 9-10 степень извлечения гидроксида меди достигает 90-97% и гидроксида цинка 90-99%, что свидетельствует об эффективности протекаемого процесса по сравнению с системой без добавок.

Наиболее эффективно ЭФ протекает при соотношении ΣCu, Zn : NH<sub>3</sub> - 1:(2-5), при увеличении концентрации лиганда степень извлечения металлов снижается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Виноградов С.С.** Экологически безопасное гальваническое производство. М.: Глобус. 2002. 352 с.
2. **Балмасов А.В., Гридчин С.Н., Шеханов Р.Ф.** Электроосаждение цинк-никелевых сплавов из щелочных комплексных электролитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 1. С. 51-53.
3. **Балмасов А.В., Гридчин С.Н., Румянцева К.Е., Шеханов Р.Ф.** Электроосаждение сплавов кобальт-никель и цинк-никель из сульфатно-хлоридных электролитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2014. Т. 57. Вып. 8. С. 47-51.
4. **Sillanpää M., Shestakova M.** Методы электрохимической очистки воды: основы, методы и полномасштабное применение. *Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications.* 2017. С. 1-310.
5. **Ксенофонтов Б.С.** Очистка сточных вод: кинетика флотации и флотокоагуляции: монография. Москва: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М. 2020. 256 с.
6. **Krutchinina E.N., Kuzin N. E.** Purification of circulating and waste water in metallurgical industry using complex coagulants. *CIS Iron and Steel Review.* 2019. V. 18. P. 72-75. DOI: 10.17580/cisirs.2019.02.15.
7. **Kolesnikov V.A., P'in V.I., Brodskiy V.A.** Electroflotation during wastewater treatment and extraction of valuable compounds from liquid technogenic waste: A Riew. *Theoret. Found. Chem. Eng.* 2017. V. 51. N 4. С. 361-375. DOI: 10.1134/S0040579517040200.

## REFERENCES

1. **Vinogradov S.S.** Environmentally safe galvanic production. M.: Globus. 2002. 352 p. (in Russian).
2. **Balmasov A.V., Gridchin S.N., Shekhanov R.F.** Electrodeposition of zinc-nickel alloys from alkaline complex electrolytes. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2016. V. 59. N 1. P. 51-53 (in Russian).
3. **Balmasov A.V., Gridchin S.N., Rumyantseva K.E., Shekhanov R.F.** Electrodeposition of cobalt-nickel and zinc-nickel alloys from sulfamate-chloride electrolytes. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2014. V. 57. N 8. P. 47-51 (in Russian).
4. **Sillanpää M., Shestakova M.** Methods of electrochemical water treatment: basics, methods and full-scale application. *Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications.* 2017. P. 1-310 (in Russian).
5. **Ksenofontov B.S.** Wastewater treatment: kinetics of flotation and flotation combines: monograph. Moscow: FORUM Publishing House: INFRA-M. 2020. 256 p. (in Russian).
6. **Krutchinina E.N., Kuzin, N. E.** Purification of circulating and waste water in metallurgical industry using complex coagulants. *CIS Iron and Steel Review.* 2019. V. 18. P. 72-75. DOI: 10.17580/cisirs.2019.02.15.
7. **Kolesnikov V.A., P'in V.I., Brodskiy V.A.** Electroflotation during wastewater treatment and extraction of valuable compounds from liquid technogenic waste: A Riew. *Theoret.*

8. **Kolesnikov A.V., П'ин V.I., Kolesnikov V.A.** Electroflotation in wastewater treatment from oil products, dyes, surfactants, ligands, and biological pollutants: A Review. *Theoret. Found. Chem. Eng.* 2019. V. 53. N 2. P. 251–273. DOI: 10.1134/S0040579519010093.
9. **Колесникова О.Ю., Колесников В.А., Губин А.Ф., Перфильева А.В.** Повышение эффективности электрофлотационной очистки сточных вод производства печатных плат от ионов меди в присутствии комплексообразователей, поверхностно-активных веществ и флокулянтов. *Журн. Прикл. Химии*. 2017. Т. 90. Вып. 5. С. 598–603.
10. **Колесников В.А., Губин А.Ф., Колесникова О.Ю., Кондратьева Е.С.** Электрофлотационное извлечение труднорастворимых соединений меди из промывных вод производства печатных плат. *Теорет. Основы Хим. Технол.* 2016. Т. 50. Вып. 4. С. 393–401. DOI: 10.7868/S0040357116040060.
11. **Аунг Пьяе, Хейн Тху Аунг, Колесников А.В.** Влияние композиции фосфатирования Decordal на электрофлотационное извлечение труднорастворимых соединений Cu, Ni, Zn, Co, Fe, Al из промывных и сточных вод. *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2019. Т. 27. Вып. 2. С. 31–39.
12. **Esfandiyari Y., Mahdavi Y., Seyedsalehi M., Hoseini M., Safari G.H., Ghozikali M.G., Kamani H., Jaafari J.** Degradation and biodegradability improvement of the olive mill wastewater by peroxi-electrocoagulation/ electrooxidation-electroflotation process with bipolar aluminum electrodes. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2014. DOI: 10.1007/S1135601438825.
13. **Matis K.A.** Flotation as a separation process. New York: Wiley. 2015. P. 97–110.
14. **Shemi A., Hsieh J., Lee D.** Clarification of flexographic wastewater by electrocoagulation and electroflotation. *Appita J.* 2014. V. 67. N 3. 212 p. DOI: 10.1134/S004035711901093.
15. **Merzouk B., Madani K., Sekki A.** Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique. *Desalination*. 2008. V. 228. N 1–3. 245 p.
16. **Skender A., Moulai-Mostefa N., Tir M.** Effects of operational parameters on the removal efficiency of nonionic surfactant by electroflotation. *Desal. Water Treat.* 2010. V. 13. N 1–3. 213 p. DOI:10.5004/dwt.2010.992.
17. **Palomino R.J.A., Cardoso J.F.S.S., Figueiredo R.T., Silva D.P., Cavalcanti E.B.** Treatment of Biodiesel Wastewater by Combined Electroflotation and Electrooxidation Processes. *Separat. Sci. Technol.* 2013. V. 48. 2073 p.
18. **da Mota I.O., de Castro J.A., Casqueira R.G., de Oliveira Junior A.G.** Study of electroflotation method for treatment of wastewater from washing soil contaminated by heavy metals. *J. Mater. Res. Technol.* 2015. V. 4. N 2. 109 p. DOI:10.2016/j.jmrt.2014.11.004.
19. **Gamage N.P., Chellam S.** Mechanisms of physically irreversible fouling during surface water microfiltration and mitigation by aluminum electroflotation pretreatment. *Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 48. N 2. 1148 p. DOI: 10.1021/es405080g.
20. **Davila J.A., MacHuca F., Marrianga N.** Treatment of vinasses by electrocoagulation-electroflotation using the Taguchi method. *Electrochimica Acta*. 2011. V. 56. 7433 p.
21. **Ji M., Jiang X., Wang F.** A mechanistic approach and response surface optimization of the removal of oil and grease from restaurant wastewater by electrocoagulation and electroflotation. *Desal. Water Treatm.* 2015. V. 55. N 8. 2044 p. DOI: 10.1080/19443994.2014.929034.
22. **Ksentini I., Ben Mansour L.** Modeling the hydrodynamics of an electroflotation column for the treatment of industrial wastewaters. *Desal. Water Treatm.* 2014. V. 56. N 7. 1722 p. DOI: 10.1080/19443944.2014.950989.
8. **Kolesnikov A.V., П'ин V.I., Kolesnikov V.A.** Electroflotation in wastewater treatment from oil products, dyes, surfactants, ligands, and biological pollutants: A Review. *Theoret. Found. Chem. Eng.* 2019. V. 53. N 2. P. 251–273. DOI: 10.1134/S0040579519010093.
9. **Kolesnikova O.Yu., Kolesnikov V.A., Gubin A.F., Perfilieva A.V.** Improving the efficiency of electroflotation treatment of wastewater from printed circuit boards production from copper ions in the presence of complexing agents, surfactants and flocculants. *Zhurn. Prikl. Khim.* 2017. V. 90. N 5. P. 598–603 (in Russian).
10. **Kolesnikov V.A., Gubin A.F., Kolesnikova O.Yu., Kondrat'eva E.S.** Electroflotation extraction of sparingly soluble copper compounds from rinsing waters of printed circuit boards production. *Teoretich. Osnovy Khim. Tekhnol.* 2016. V. 50. N 4. P. 393–401 (in Russian). DOI: 10.7868/S0040357116040060.
11. **Aung Pyae, Hein Thu Aung, A.V. Kolesnikov A.V.** Influence of Decordal phosphating composition on electroflotation extraction of sparingly soluble compounds of Cu, Ni, Zn, Co, Fe, Al from rinsing and waste waters. *Gal'vanotekh. Obrab. Poverkh.* 2019. V. 27. N 2. P. 31–39 (in Russian).
12. **Esfandiyari Y., Mahdavi Y., Seyedsalehi M., Hoseini M., Safari G.H., Ghozikali M.G., Kamani H., Jaafari J.** Degradation and biodegradability improvement of the olive mill wastewater by peroxi-electrocoagulation/ electrooxidation-electroflotation process with bipolar aluminum electrodes. *Environ. Sci. Pollut. Resech.* 2014. DOI: 10.1007/S1135601438825.
13. **Matis K.A.** Flotation as a separation process. New York: Wiley. 2015. P. 97–110.
14. **Shemi A., Hsieh J., Lee D.** Clarification of flexographic wastewater by electrocoagulation and electroflotation. *Appita J.* 2014. V. 67. N 3. 212 p. DOI: 10.1134/S004035711901093.
15. **Merzouk B., Madani K., Sekki A.** Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique. *Desalination*. 2008. V. 228. N 1–3. 245 p.
16. **Skender A., Moulai-Mostefa N., Tir M.** Effects of operational parameters on the removal efficiency of nonionic surfactant by electroflotation. *Desal. Water Treatment*. 2010. V. 13. N 1–3. 213 p. DOI:10.5004/dwt.2010.992.
17. **Palomino R.J.A., Cardoso J.F.S.S., Figueiredo R.T., Silva D.P., Cavalcanti E.B.** Treatment of Biodiesel Wastewater by Combined Electroflotation and Electrooxidation Processes. *Sep. Sci. Technol.* 2013. V. 48. 2073 p.
18. **Da Mota I.O., de Castro J.A., Casqueira R.G., de Oliveira Junior A.G.** Study of electroflotation method for treatment of wastewater from washing soil contaminated by heavy metals. *J. Mater. Res. Technol.* 2015. V. 4. N 2. 109 p. DOI:10.2016/j.jmrt.2014.11.004.
19. **Gamage N.P., Chellam S.** Mechanisms of physically irreversible fouling during surface water microfiltration and mitigation by aluminum electroflotation pretreatment. *Environ. Sci. Technol.* 2014. V. 48. N 2. 1148 p. DOI: 10.1021/es405080g.
20. **Davila J. A., MacHuca F., Marrianga N.** Treatment of vinasses by electrocoagulation-electroflotation using the Taguchi method. *Electrochimica Acta*. 2011. V. 56. 7433 p.
21. **Ji M., Jiang X., Wang F.** A mechanistic approach and response surface optimization of the removal of oil and grease from restaurant wastewater by electrocoagulation and electroflotation. *Desal. Water Treatment*. 2015. V. 55. N 8. 2044 p. DOI: 10.1080/19443994.2014.929034.
22. **Ksentini I., Ben Mansour L.** Modeling the hydrodynamics of an electroflotation column for the treatment of industrial wastewaters. *Desal. Water Treatment*. 2014. V. 56. N 7. 1722 p. DOI: 10.1080/19443944.2014.950989.

Поступила в редакцию (Received) 24.09.2020  
 Принята к опубликованию (Accepted) 13.09.2021