

УДК 622.7:504.063.43

**И.В. Шадрунова, Н.Н. Орехова**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ШАХТНЫХ И ПОДОТВАЛЬНЫХ ВОД**

*Проведено всестороннее исследование гальванокоагуляционной технологии извлечения меди и цинка из шахтных и подотвальных вод. Исследования включали термодинамическое моделирование, выявление кинетических закономерностей селективного разделения металлов, изучение фазовых составов осадков, лабораторные и укрупнённо-лабораторные испытания на модельных и реальных водах.*

*Ключевые слова:* ресурсоиспользование, гальванокоагуляция, моделирование, факторы, подотвальные воды, шахтные воды, модельный раствор, лабораторный эксперимент, извлечение, медь, цинк.

---

**И**звлечение металлов из техногенных вод горных предприятий медно-цинковой подотрасли является неотъемлемым условием реализации безотходного производства. Наиболее сложным вопросом является получение в процессе переработки вод металлоодержащих продуктов пригодных для дальнейшей утилизации. В современной экономической ситуации на данном уровне развития науки и техники технологически трудно и экономически неприемлемо (с учетом затрат) стремиться к получению вторичных продуктов с содержанием цветных металлов на уровне массовых долей в кондиционных концентратах. Более целесообразно получение, при извлечении металлов из вод, присадок, добавок, флюсов, обогащенных извлекаемым металлом. Такие продукты могут быть целенаправленно утилизированы в составе шихты в плавильном переделе. Это позволит снизить потери металлов со сточными и попутнодобываемыми водами и превратит добавку в дополнительный источник металлов.

Задача создания безотходного производства на «локальном» уровне отдельного горного предприятия в нынешних условиях трудноразрешима. Вместе с тем, создание малоотходного, а в перспективе и безотходного производства возможно при объединении предприятий в крупные ассоциации с единым управляемым центром. При таком подходе переработка техногенных вод может быть осуществлена с получением продуктов пригодных для утилизации на предприятиях разных переделов. Может быть реализован принцип комплексности переработки жидких и твёрдых отходов предприятий на основе технологической и экологической обоснованности совместной утилизации. Возможно максимальное использование уже имеющихся разработок по очистке сточных вод горных производств, что позволит минимизировать затраты на реализацию мероприятий.

Сегодня для горных предприятий наиболее изученным и распространённым способом извлечения меди из сернокислых растворов является цементация железом. Применение этого

метода ограничено рН среды 2,5—4,5 и концентрацией меди в растворе более 100 мг/дм<sup>3</sup>. Современные способы цементации — это виброцементация [1] и цементация в барабанном цементаторе [2], позволяют извлечь из сернокислотных растворов до 96%—98% меди при содержании её в цементном осадке 87—90 %. Однако после цементации и отделения цементной меди слив содержит большое количество растворённого железа и концентрация цветных металлов в нем многократно превышает ПДК. Такая вода требует дальнейшей очистки желательно с получением утилизируемых продуктов.

В настоящее время экономически приемлемыми и экологически целесообразными методами, на основе которых может быть создана технология ресурсовоспроизводящей переработки являются гальванокоагуляция и сорбция. К явным преимуществам этих методов можно отнести возможность использования отходов производства в качестве загрузки гальванокоагулятора или сорбента. При переработке вод могут быть получены, железоокисные металлсодержащие осадки, карбонаты металлов (геохимические карбонатные барьеры) и металлы в теле силикатной матрицы (сорбция цеолитсодержащими породами).

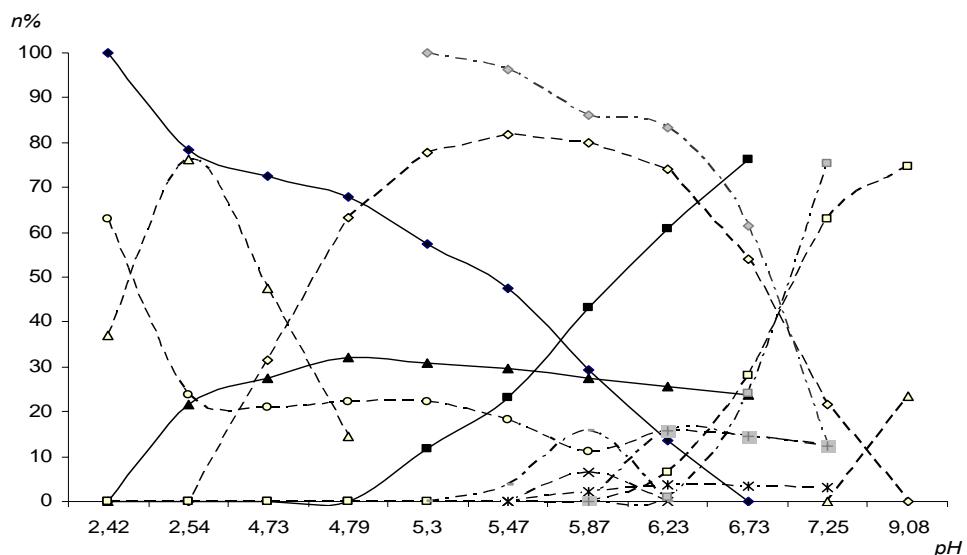
Для разработчиков технологий важна информация о достижимых массовых долях металлов в продуктах переработки. В рамках данной работы проведено всестороннее исследование гальванокоагуляционной технологии извлечения меди и цинка из шахтных и подотвальных вод. Исследования включали термодинамическое моделирование, выявление кинетических закономерностей селективного разделения металлов, изучение фазовых составов осадков, лабо-

раторные и ургунённо-лабораторные испытания на модельных и реальных водах.

### Используемые методики

Физико-химическое моделирование проведено методом минимизации свободной энергии с использованием программного комплекса «Селектор-С». Входными параметрами термодинамической модели являлись: стандартные изобарно-изотермические потенциалы образования соединений; стандартные энтропии; коэффициенты активности ионов в растворе, рассчитанные итерационным методом с применением модифицированного уравнения Дебая-Хюкеля; мольные количества независимых компонентов системы; температура и давление. Учтена открытость системы к обмену с атмосферой. Рассчитан равновесный состав гетерогенной многокомпонентной системы CuSO<sub>4</sub>, Cu(OH)<sub>2</sub>-ZnSO<sub>4</sub>, Zn(OH)<sub>2</sub>-Fe-C-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O.

Матрица моделируемой системы включала 7 независимых и 125 зависимых компонентов, в том числе 39 компонентов твердых фаз и 77 компонентов водных растворов электролитов. Моделирование взаимодействий в исследуемых системах проводили при концентрации серной кислоты 0,0001—0,2 моль/кг, сульфатов меди и цинка 0,001—0,02 моль/кг, содержании металлического железа 0,005—0,05 моль/кг, мольном соотношении железа и кислорода 0,7—1,4, соотношении железа и углерода 1:3, общем давлении 100 кПа, температуре 298 К. Диапазон концентраций меди и цинка в системе был выбран исходя из химического состава рудничных и подотвальных вод горных предприятий медного комплекса. Учтены процессы комплексообразования, гидролиза, гидратации, диссоциации и полимеризации в рас-



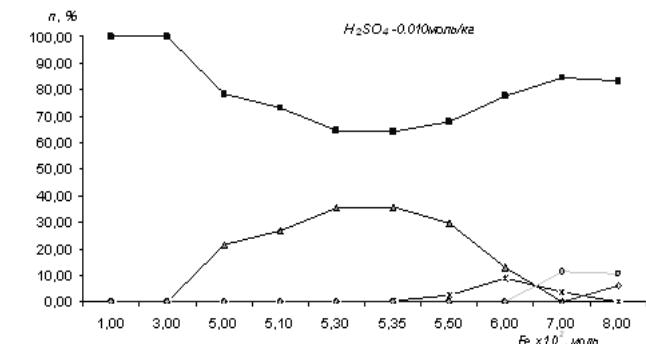
**Рис. 1. Фазовый состав осадков в зависимости от рН среды и соотношения Fe/O<sub>2</sub>:**  
сплошная линия — 1:1, пунктируная линия — 2:1, штрихпунктирная = 1:1,5

—♦—  $Fe_2O_3$ ; —■—  $Zn(FeO_2)_2$ ; —▲—  $CuFeO_2$ ; —\*—  $Cu_2S$ ; —○—  $Cu_5FeS_4$ ; —■—  $CuO$ ; —×—  $Cu_3FeS_4$ ; —···—  $CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$

тврах. Переменными факторами при моделировании являлись содержание железа, соотношение железа и кислорода в системе, концентрации серной кислоты, сульфатов цинка и меди.

Экспериментальные осадки для

фазового и микроскопического анализа получены на лабораторной гальваноагуляционной установке. Установка включает расходную емкость, аэратор, устройство для регулирования скорости подачи раствора, накопительную емкость. Диаметр барабана лабораторного гальваноагулятора 110 мм; длина — 350 мм, объем рабочей зоны — 200 см<sup>3</sup>. Использовалась гальванопара «железо-углерод». Носителями элементов гальванопары являлись воронёная стальная стружка и кокс в соотношении 3:1. В качестве модельных систем использовались растворы химически чистых реагентов: медь сернокислая (сульфат) 5-вод., чда; цинк сернокислый (сульфат) 7-вод., чда.



**Рис. 2. Фазовый состав осадков в зависимости от содержания железа в системе в области селективного извлечения меди:**

—■—  $Fe_2O_3$ ; —▲—  $CuFeO_2$ ; —\*—  $Cu_2S$ ;  
—△—  $Cu_5FeS_4$ ; —◇—  $CuFeS_2$

Таблица 1

**Качественная характеристика относительного содержания фаз в осадках**

№	Фазы в порядке убывания количества		№	Фазы в порядке убывания количества фаз	
	Формула	Название		Формула	Название
	без аэрации				с аэрацией
1	Cu <sub>2</sub> O	куприт	1	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	магнетит
2	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	магнетит	2	βCuFeO <sub>2</sub>	феррит
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *CuO	феррит	3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *CuO	феррит
4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *1.2H <sub>2</sub> O;	оксиды	4	Cu	элементная медь
5	Cu	элементная медь	5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *1.2H <sub>2</sub> O	оксиды

Для исключения случайных ошибок, перед каждой серией опытов аппарат готовился по методике, описанной в монографии [2].

Изучение фазового состава проводили рентгеноструктурным методом в кобальтовом Ка излучении в камере Дебая. Использована относительная количественная оценка выхода соединений.

Микроскопическое изучение проводили в лаборатории электронной микроскопии кафедры «физической химии» Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск). Пробы обрабатывались на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6460 LV.

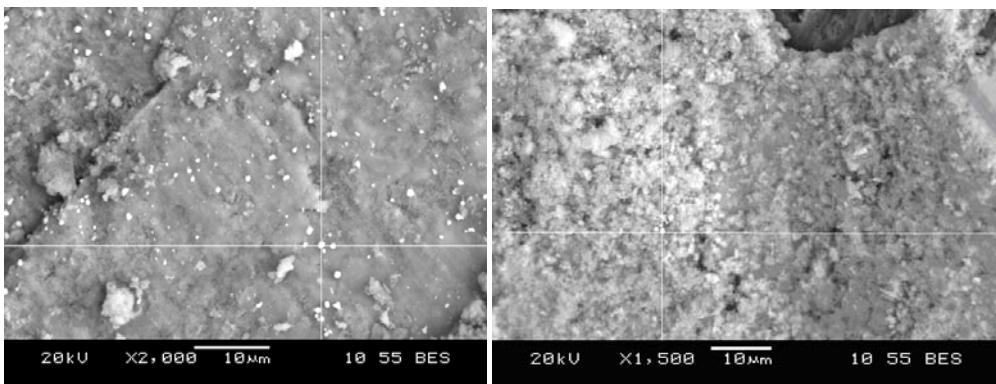
Укрупнённые лабораторные испытания двухстадиального гальванокоагуляционного извлечения меди и цинка из техногенных вод проведены в центральной исследовательской лаборатории ОФ Сибайского филиала ОАО «УГОК». Отбор проводили из организованного потока на территории Сибайского подземного рудника (СПР). Использовались реальная и модельная воды:

— Объединённый поток техногенных вод Сибайского и Камаганского карьеров: (карьерных «Камаган», шахтных Сибайского подземного рудника (СПР) и подотвальных с промп-

лощадки Сибайского карьера). Среднее содержание мг/дм<sup>3</sup>: меди — 0,11; цинка — 7,588; железа — 0,49; хлориды — 95,71; сульфаты — 1534,9. Показатель pH среды — 7,65.

— Модельные подотвальные воды (готовились растворением сульфатных солей меди, цинка и железа в воде вышеописанного качества). Среднее содержание мг/дм<sup>3</sup>: меди — 23,75; цинка — 31,73; железа — 12,00; хлориды — 97,85; сульфаты — 1710,1. Показатель pH среды — 3,6. Параметры технологического процесса приняты по результатам экспериментов, проводимых в ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». Технологическая схема включала две стадии гальванокоагуляционной обработки воды с последующим отстаиванием после каждой стадии и доочистку слива на геохимическом барьере.

В первой стадии использовали гальванопару железо-углерод (железная стружка — кокс) в объёмном соотношении 3:1. Во второй гальванопару железо-углерод (железная стружка — кокс) в объёмном соотношении 1:1. В качестве материала двухслойного геохимического барьера применяли цеолитсодержащую породу Сибайского медноколчеданного месторождения, и известняк Агаповского месторождения. Время обра-



**Рис. 3. Микрофотографии поверхности катодной(слева) и анодной (справа) частиц, в перекрестии характерный агрегат цементной меди**

ботки воды в поле гальванопары составляло соответственно для I и II стадии 5 и 15 минут. Скорость фильтрации воды через двухслойный геохимический барьер — 10 м/ч.

Химический анализ проб воды и осадков проводился в центральной химической лаборатории Сибайского филиала ОАО «УГОК» по стандартным методикам.

### Результаты и обсуждение

Результаты моделирования показали, что при достижении равновесного состояния системы в изучаемом диапазоне входных параметров в зависимости от кислотности, окислительно-восстановительных условий, содержания сульфат-ионов и железа медь выделяется из сульфатных растворов в виде феррита, гидроксосульфатов, оксидов и сульфидов различного состава, цинк переходит в осадок в виде феррита или сульфида (рис. 1).

Увеличение содержания железа в системе приводит к последовательному переходу меди в осадок в виде гидроксосульфатов, ферритов и сульфидов. В окислительных условиях ( $\text{Fe}/\text{O}_2 = 0,56$ ) осадки содержат феррит цинка, оксид меди, брошантит и гематит. При соотношении  $\text{Fe}/\text{O}_2 = 1,0$  осадки содержат ферриты цинка и

меди. В восстановительных условиях ( $\text{Fe}/\text{O}_2 = 1,4$ ) твердая фаза представлена ферритом цинка, а также сульфидами цинка, меди, железа.

При мольных соотношениях  $\text{Fe}/\text{Cu} < 5$  медь переходит в твердую фазу в виде  $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ . Степень осаждения меди уменьшается до 20—25 масс %. При соотношении  $\text{Fe}/\text{Cu} = 5$  резко снижается окислительно-восстановительный потенциал системы. Растет кислотность, резко увеличивается концентрация железа и падает концентрация меди в растворах. Степень осаждения меди достигает 95 %. Медь выделяется из растворов преимущественно в виде феррита. Осадки представлены гематитом (65 масс.%) и ферритом меди (35 масс.%). Дальнейшее увеличение содержания железа  $\text{Fe}/\text{Cu} > 5$  приводит к образованию в осадках сульфидов меди различного состава —  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ . (рис. 2).

Максимальная массовая доля меди в осадках наблюдается в диапазоне  $\text{pH} 2,54—4,79$ , причём наиболее полное выделение меди из растворов в виде феррита происходит при соотношении  $\text{Fe}/\text{Cu} = 5$  и  $\text{pH}$  равновесных растворов 2,76—3,83.

Таблица 2

**Влияние концентрации серной кислоты на форму нахождения цинка в равновесной системе при 25 °C, Р<sub>общ.</sub> 1 атм., различных мольных соотношениях Fe:O<sub>2</sub>**

Мольное соотношение Fe:O <sub>2</sub>	Конц. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , моль/кг H <sub>2</sub> O	рН	Ehx10	-lgpO <sub>2</sub> атм	Концентрация в равновесном растворе -lg m, моль/кг	Содержание в равновесном осадке, масс %	
					Zn <sup>2+</sup>	Zn(FeO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	ZnS
1:1	0	6,79	6,02	15,1	6,10	76,14	
	0,01	6,26	5,70	19,4	2,30	60,83	
	0,02	6,25	5,69	19,5	2,00	43,34	
	0,03	6,24	5,68	19,6	2,00	23,06	
	0,035	6,24	5,68	19,6	1,75	11,67	
	0,040	4,89	4,90	30,4	1,70	0	
	0,045	2,76	4,55	41,2	1,70	0	
	0,050	2,65	4,66	41,0	1,70	0	
	0,065	2,28	5,22	38,6	1,70	—	
1:0,72	0	9,08	-3,89	—	8,81	74,54	
	0,01	6,25	-1,0	64,9	2,81	62,82	3,07
	0,03	6,23	-0,96	64,6	1,94	28,04	3,53
	0,04	6,23	-0,95	64,6	1,78	6,51	3,81
	0,045	5,87	-0,78	64,9	1,72	0	2,03
	0,05	5,47	-0,74	66,2	1,70	0	0
	0,06	5,30	-0,52	65,4	1,70	0	
	0,07	4,79	0,33	61,7	1,70	0	
	0,08	4,73	0,38	61,6	1,70	0	
	0,09	2,54	2,47	56,2	1,70	0	
	0,10	2,42	2,60	55,8	1,70	0	

Снижение содержания кислорода в системе (Fe/O<sub>2</sub> = 1,4) и pH до 2,5 позволяет повысить долю медьсодержащих соединений в осадках до 76—80 масс %. Однако, при этом, наряду с ферритом меди, в осадках присутствует значительное количество сульфидов меди (I), а в растворах растет концентрация железа.

Это положение коррелирует с результатами изучения фазового состава осадков полученных при кратковременной обработке модельного раствора без предварительной аэрации (осадок I) и после продувки воздухом в поле гальванопары (осадок II). В составе первой пробы зафиксировано наличие куприта Cu<sub>2</sub>O (табл. 1.), который является продуктом восстанов-

ления меди (II) и образуется по законам электрохимической кинетики. Так же идентифицированы фазы феррита меди Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CuO и железоокисные фазы магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, лепидокрокита FeOOH и гидратированных оксидов железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·1,2H<sub>2</sub>O, которые при стремлении системы к равновесию перейдут в гематит.

Во второй пробе отсутствует фаза лепидокрокита, но появляется фаза βCuFeO<sub>2</sub>, предсказанная результатами моделирования. Богатая по меди фаза Cu<sub>2</sub>O преобладает в первом осадке. Содержание меди в осадке I в 1,55 превышает этот показатель для осадка II.

Электронно-микроскопические исследования данных осадков, сделанные в процессе работ, показали нали-

Таблица 3

**Фазовый состав осадков и условия их получения**

№	Фазы в порядке убывания количества		№	Фазы в порядке убывания количества	
	Формула	Название		Формула	Название
	без аэрации			с аэрацией	
1	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	магнетит	1	ZnO	цинкит
2	Fe(OH) <sub>3</sub>	гидроксид	2	FeO	вюстит
3	ZnCO <sub>3</sub>	смитсонит	3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	магнетит
4	Zn(FeO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	франклинит	4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	гематит
5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	гематит	5	Fe(OH) <sub>3</sub>	гидроксид
6	Zn(OH) <sub>2</sub>	гидроксид	6	Zn(FeO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	франклинит
8	FeOOH	лепидокрокит	8	Fe(OH) <sub>2</sub>	гидроксид
9	FeO	вюстит	9	ZnCO <sub>3</sub>	смитсонит
10	ZnO	цинкит			

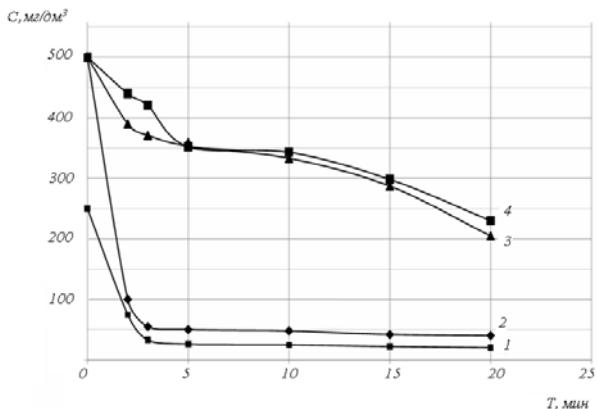
чие в них округлых зародышей цементной меди и железоокисных медь-содержащих агрегатов, не имеющих определенной формы. Микроскопированием компонентов гальванопары установлено, что цементация меди происходит не только на поверхности железного анода, но и на катоде (рис. 3). Такое увеличение площади реагирующей поверхности способствует повышению скорости цементации. Зародыши видны на железосодержащей пленке катода, образованной восстановлением железа и адсорбцией свежеобразованных железоокисных соединений.

По результатам моделирования полнота выделения цинка из сульфатных растворов в значительной степени зависит как от кислотности растворов, окислительно-восстановительных условий, так и от концентрации сульфат-ионов. Образование нерасторимых цинкодержащих соединений наиболее вероятно при pH равновесных растворов выше 6,2 и концентрации сульфатов менее

0,045 моль/кг. Увеличение концентрации сульфат-ионов и снижение pH приводит к значительному повышению растворимости соединений цинка вследствие образования гидросульфатных комплексов цинка в растворах. Степень извлечения цинка в твердую фазу снижается (табл. 2). Избирательное выделение цинка не достигается. С ростом содержания кислорода в системе увеличивается остаточная концентрация цинка и железа в растворах и несколько возрастает массовая доля цинка в осадках, что связано с увеличением в этих условиях содержания Zn(FeO<sub>2</sub>)<sub>2</sub> в осадке.

В табл. 3. представлен фазовый состав осадков, полученных при обработке раствора цинкового купороса с концентрацией цинка 500 мг/дм<sup>3</sup> и pH = 5,5 в течение 5 минут. В осадках, полученных из аэриированного раствора фиксируется фаза оксида цинка.

Что не противоречит расчётному фазовому составу, поскольку как



**Рис. 4. Кинетика извлечения металлов из двухкомпонентных растворов:** 1, 2 – меди; 3, 4 – цинк; 1, 3 –  $C_{\text{Cu}}^{2+}/C_{\text{Zn}}^{2+} = 1:2$ ; 2, 4 –  $C_{\text{Cu}}^{2+}/C_{\text{Zn}}^{2+} = 1:1$

показывают термодинамические расчёты, наиболее вероятной реакцией ферритизации цинка является реакция:

$2\text{Fe(OH)}_3 + \text{ZnO} = \text{Zn}(\text{FeO}_2)_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ , для которой разница ( $\Delta G_{1298}^0$  реакции  $-\Delta G_{1298}^0 \text{ CuFe}_2\text{O}_4$ )<sup>\*</sup> составляет 241,569 кДж/моль. Этот показатель меньше только для реакции образования феррита из гидроксидов цинка и железа (III). При стремлении системы к равновесию оксид цинка перейдет в феррит.

Оптимальным диапазонами значений параметров для избирательного выделения меди из сульфатных растворов, содержащих 0,01 моль/кг, меди (II) и 0,01 моль/кг цинка (II), являются pH 2,6–4,1, Eh 0,16–0,39 В.

Следует особо отметить, что при осуществлении постоянного перемешивания загрузки в гальванокоагуляторе система не достигает равновесного состояния, однако, вероятно, стремится к нему. При неравновес-

ных условиях наряду с гематитом и ферритами цветных металлов образуются магнетит и лепидокрокит, цинкит и оксиды меди.

Анализ результатов проведённых теоретических и экспериментальных исследований позволяет говорить о том, что более значимыми для разработки технологии являются кинетические закономерности, а проведённое моделирование способствует созданию теоретической базу

для совершенствования технологии гальванокоагуляционного извлечения меди и цинка из растворов.

Расхождение результатов теоретического моделирования в программе «Селектор» обусловлено в первую очередь неравновесностью изучаемой системы и показывает необходимость введения кинетических ограничений.

В нижней границе поля параметров соответствующих получению наиболее богатого по меди осадка при селективном её выделении и одновременном связывании железа (в условиях соответствующих преимущественному образованию железоокисных соединений  $\text{CuFeO}_2$  и  $\text{Zn}(\text{FeO}_2)_2$ ) проведена обработка модельного медь- и цинк- содержащего раствора  $C_{\text{Cu}}^{2+} = C_{\text{Zn}}^{2+} = 0,01$  моль/кг (гальванопара железо-углерод) при времени контакта 1 и 5 минут в статическом режиме. Как показывают кинетические закономерности (рис. 4.), подробно описанные в нашей монографии [3] извлечение меди из двухкомпонентного раствора на 90% происходит менее чем за 5 минут.

Теоретически в выбранных условиях (pH = 2,5 и  $\text{Fe}/\text{O}_2 = 1,0$ ) осадок состоит из гематита (76,24 масс.%)

\*Методика определения наиболее термодинамически активной реакции подробно описана в монографии [3].

Таблица 4  
**Результаты испытаний**

Техногенная вода	Показатель	Концентрация в воде, мг/дм <sup>3</sup>				Массовая доля металлов в осадках, %	
		Исходная	После первой стадии	После второй стадии	После г'х барьера	Первая стадия	Вторая стадия
Объединённый поток	Cu <sup>2+</sup>	0,11	0,091	0,081	0,068	0,001	0,000
	Zn <sup>2+</sup>	7,588	0,307	0,201	0,145	0,508	0,03
	Fe <sub>общ</sub>	0,490	1,277	0,404	0,264	59,540	61,23%
	pH	7,650	8,0	8,1	8,25		
Модельные подотвальные воды	Cu <sup>2+</sup>	23,750	2,206	0,570	0,051	1,453	0,095
	Zn <sup>2+</sup>	31,730	23,300	0,374	0,140	0,473	1,333
	Fe <sub>общ</sub>	12,000	16,100	0,663	0,001	53,00	57,56
	pH	3,6	5,7	7,8	8,3		

и феррита меди (23,76 масс.%) и следовательно массовая доля элементов в осадке составляет: меди 11,76, кислорода 27,82 и железа 61,42% при атомарном соотношении элементов 1:7:3. Экспериментальные осадки обработки двухкомпонентного раствора содержат в своем составе в порядке убывания массовой доли железо, кислород, углерод, медь, цинк, серу при этом углерод представлен частицами кокса перешедшего в осадок при механическом его разрушении. По мере увеличения времени контакта с 1 до 5 минут массовая доля меди возрастает в 8,2 раза с 0,57 до 4,68 % (за вычетом кокса до 5,63 %) при росте извлечения от 38,2 до 90,0 %.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований приняты параметры технологического процесса и проведены укрупнённые лабораторные испытания. Технологическая схема включала две стадии гальванокоагуляционной обработки воды с последующим двухчасовым отстаиванием после каждой стадии и доочистку слива на геохимическом барьеце. Перед второй стадией про-

водилась аэрация воды. Достигнутые показатели представлены в таблице 4.

Полученный в процессе обработки нейтрального объединённого потока продукт второй стадии (гальванопара железо-углерод) с содержанием железа 61,23 %, меди менее 0,001 % и цинка менее 0,5 % соответствует техническим условиям пигмента жёлтого железоокисного (ГОСТ 18172—80). При обработке кислых модельных вод с большей концентрацией металлов возрасла их массовая доля в осадках. Для осадка первой стадии коэффициент селекции при соотношении концентраций меди и цинка в исходном растворе 0,74 составляет 2,53. Для осадка второй стадии при соотношении концентраций меди и цинка в поступающем растворе 0,094 коэффициент селекции — 0,071.

Исследования показали возможность селективного концентрирования металлов при равенстве порядков их концентраций в растворе.

### **Выводы**

Метод гальванокоагуляции является эффективным для очистки шахтных вод от цинка, для которого от-

мечена тенденция роста концентрации [3] в рудничных водах медно-цинковых месторождений Южного Урала. В ходе испытаний достигнуто снижение концентрации меди в 1,7 и цинка в 220 раз, суммарное извлечение металлов из техногенных вод составило для меди 50,9 % и цинка 99,9 %

Массовая доля металлов в осадках зависит от аэрированности вод и исходной концентрации извлекаемых металлов в растворах. На селективность концентрирования металлов в осадках влияет pH раствора и продолжительность обработки.

Полученные продукты первой и второй стадии обработки объединённого потока с содержанием железа 59,54 % и 61,23 %, меди менее 0,001 % и цинка менее 0,5 % соответствует техническим условиям пигmenta жёлтого железоокисного (ГОСТ 18172-80). Полученный про-

дукт первой стадии обработки модельного стока с содержанием железа 53,00 %, меди 1,453 % и цинка менее 0,5 % может быть утилизирован при выплавке медистого чугуна с содержанием меди до 2,5 %. Или в составе шихт на медеплавильном заводе. Отработанный сорбент геохимического барьера может быть использован в качестве покровно-рафинирующего флюса в металлургии меди и цинка.

Гальванокоагуляция в ресурсово-зобновляющей переработка техногенных вод может применяться для извлечения меди из низкоконцентрированных вод, образующихся, в том числе, и после цементации.

Двухстадиальная схема гальванокоагуляционной обработки вод позволяет получать железоокисные продукты с преобладанием меди или цинка, утилизируемые в металлургическом переделе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Феофанов В.А., Дзюбинский Ф.А. Гальванокоагуляция: теория и практика бессточного водопользования Магнитогорск: МиниТип, 2006. 368 с.
2. Халезов Б.Д., Ватолин Н.А., Макурин Ю.Н., Быков Н.А. Исследование извлечения меди в барабанном цементаторе // Горный информационно-аналитический бюллетень, М., МГТУ, 2005, № 5, 302—311.
3. Извлечение цветных металлов из гидроминеральных ресурсов: теория и практика / Шадрунова И.В., Орехова Н.Н. — Магнитогорск, МиниТип, ПКОН РАН, 2009. — 180 с. ГЛАБ

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шадрунова Ирина Владимировна – профессор, доктор технических наук, ученый секретарь shadrunova@mail.ru  
Институт проблем комплексного освоения недр РАН.  
Орехова Наталья Николаевна – доцент, кандидат технических наук кафедры «Обогащения полезных ископаемых», nn\_orehova@mail.ru  
Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова.

