

Ивенина Ирина Владимировна

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный

технический университет»

г. Ухта, Республика Коми

DOI 10.21661/r-585790

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

***Аннотация:** в статье описана методика исследования электролизных процессов для разработки технологической схемы замкнутого цикла подготовки рабочего раствора с наночастицами магнетита для очистки воды от нефтяного загрязнения. Исследована связь между условиями проведения электролиза и его результатами.*

***Ключевые слова:** электролиз, соли железа, окислительно-восстановительные процессы.*

Работа выполнена в рамках научного проекта по созданию технологической схемы очистки воды методом магнитной сепарации водонефтяной эмульсии. Это физико-химический метод тонкой очистки воды, основанный на использовании ферромагнитных наночастиц, которыми обрабатывают загрязненную нефтью воду, после чего пропускают ее через магнитный сепаратор. После каждого цикла очистки магнетит, загрязненный нефтью, проходит регенерацию. Для этого система очистного сооружения оборудуется блоком регенерации, позволяющий восстановить технологические свойства магнетита. Блок регенерации – это комплекс аппаратов, в которых осуществляются физико-химические процессы по разделению нефте-магнетитной массы [2].

Важным этапом блока регенерации является стадия электролиза, в которой происходит частичное восстановление ионов железа (III) в ионы железа (II). Присутствие в растворе точного соотношения данных ионов является

основным условием получения наночастиц магнетита по методу Массарта. Эксперименты в лабораторных условиях позволили установить эффективность предлагаемого метода [1].

Исследования электролизных процессов показали наличие нескольких катодных реакций. Протекание той или иной реакции на электродах определяется несколькими факторами и в конечном итоге влияет на содержание продуктов электролиза в растворе, в частности, на количество ионов железа (II), которое имеет определяющее значение при подготовке рабочего раствора магнетита. Изначально условия электролиза моделировали в соответствии с общей технологической линией превращения соединений железа в блоке регенерации. Поэтому электролиз раствора хлорида железа (III) проводили в солянокислой среде (при $\text{pH} \approx 2$), что соответствует составу раствора, получаемого на предыдущем этапе регенерации. Процесс осуществляют с железными электродами, что исключает образование опасного хлора и, кроме того, растворение анода является источником ионов железа (II). В предыдущих работах были оценены результаты электролиза в зависимости от силы тока и различного соотношения площади анода и катода [1].

Процессы, происходящие на электродах, могут быть показаны следующими схемами.

Анодная реакция: $\text{Fe}^0 - 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ (растворяется анодное железо).

Возможные катодные реакции:

1) $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^0$; 2) $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$; 3) $\text{Fe}^{3+} + 1\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$;
4) $\text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^0$; 5) $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$.

В кислой среде возможно также протекание реакции химического растворения железа в кислоте, но скорость этой реакции по сравнению с электролизным растворением пренебрежительно мала (менее 1%), что было установлено на холостых опытах.

Таким образом, на катоде протекает несколько конкурирующих индифферентных друг другу реакций, и соотношение их скоростей в итоге является определяющим фактором при расчете времени электролиза. Источником ионов

железа (II) в растворе является анодная реакция и одна из катодных реакций (№2) (рис. 1).

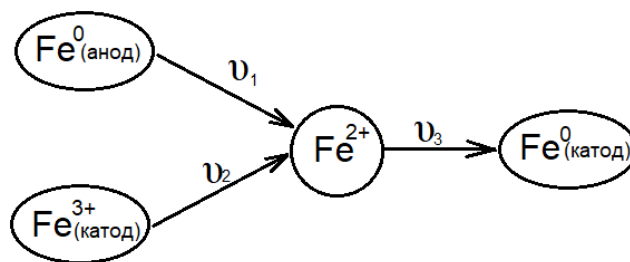


Рис. 1. Баланс ионов железа (II) в растворе при электролизе хлорида железа (III) с железным анодом

Оценка содержания ионов в растворе после электролиза проводилась методом редоксиметрического титрования, которое показало, что содержание ионов Fe^{2+} в растворе превышает их концентрацию, вычисленную исходя из убыли массы анода. Каждый процесс характеризуется своей скоростью (v_1 , v_2 , v_3). И в соответствии со схемой (рис. 1) средняя скорость образования ионов железа (II) за время электролиза будет определяться соотношением скоростей:

$$v_{\text{общ}} = v_1 + v_2 - v_3. \quad (1)$$

Принимая во внимание то, что анодное окисление железа – это единственная реакция на аноде, и скорость ее определяется только условиями проведения электролиза (сила тока, температура и др.), получаем, что итоговое содержание ионов железа (II) будет определяться соотношением скоростей конкурирующих на катоде второй и третьей реакций, то есть v_2 и v_3 .

Согласно законам Фарадея, количество эквивалентов веществ, подвергшихся электролизу равно:

$$n_{\text{э}} = \frac{I \cdot t}{F} \quad (2)$$

Все возможные конкурирующие реакции на катоде дают общий выход продукта 100% эквивалентов. Введем долевые коэффициенты: a – мольная доля ионов Fe^{2+} , поступающих в раствор по реакции 2; b – мольная доля ионов

Fe²⁺, уходящих из раствора по реакции 3. Остальные катодные реакции не влияют на содержание ионов железа (II) в конечном растворе. Тогда с учетом (4) количество эквивалентов ионов Fe²⁺, образовавшихся в растворе за счет катодных процессов (Δn_3), будет выражаться соотношением:

$$\Delta n_3 = \frac{I \cdot t}{F} (a - b) \quad (5)$$

Расчеты по этой формуле при различных значениях силы тока, пропускаемого через раствор, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение количества эквивалентов ионов железа (II), участвующих в реакциях 2 и 3 при различных значениях силы тока

№ п/п	Плотность тока на катоде (А/дм ²)	(a-b), моль-эquiv
1	5,4	0,018
2	6,7	0,012
3	8,1	0,009
4	9,4	0,006

Анализ этих экспериментальных значений приводит к экспоненциальной зависимости, которая, видимо, определяется разностью энергий активаций реакций 2 и 3 при различных значениях силы тока (плотности тока).

Список литературы

1. Ивенина И.В. Оптимизация электролизной подготовки рабочего раствора в цикле регенерации магнетита / И.В. Ивенина, Ю.Г. Смирнов // Современные проблемы развития Европейского Севера: материалы Всероссийской научно-практической конференции (Ухта, 08–09 июня 2023 г.). – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2023. – С. 122–125. EDN MOQNVL
2. Лютоев А.А. Регенерация ферромагнитных наночастиц в ходе тонкой очистки воды от эмульгированной нефти / А.А. Лютоев, И.В. Ивенина, Ю.Г. Смирнов // Рассохинские чтения: материалы международной конференции. В 2 ч. – Ч. 2. – 2018. – С. 258–260.