

Головки Д. А.,
Нефедов В. Г.,
Головки И. Д.,
Шевченко Л. В.

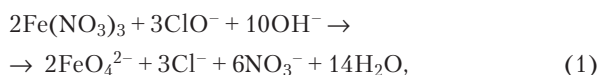
ПОЛУЧЕНИЕ ОЧИЩЕННЫХ РАСТВОРОВ ГИДРОКСИДА НАТРИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА ФЕРРАТОВ(VI)

Изучены процессы электрохимической очистки концентрированных растворов гидроксида натрия от примесей тяжелых металлов. Установлено влияние температуры, плотности тока и длительности электролиза на эффективность удаления некоторых металлов. Показано, что скорость и полнота очистки для разных металлов существенно различаются. Выявлена зависимость между степенью их удаления и технологическими показателями синтеза ферратов(VI).

Ключевые слова: синтез ферратов(VI), гидроксид натрия, примеси тяжелых металлов, очистка, электролиз.

1. Введение

Ферраты(VI) — новый класс уникальных окислителей — получают двумя наиболее распространенными способами гипохлоритным (1) и электрохимическим (2) [1–4]:



Как видно из представленных выше уравнений реакций, синтез ферратов осуществляют в щелочной среде, которую обычно создают с помощью водных растворов гидроксидов натрия или калия с концентрацией 14–16 М OH^- .

Главными проблемами при получении производных Fe(VI) являются низкие значения выходов целевых продуктов и относительно невысокая их чистота. Следует отметить, что ферраты наивысшей чистоты (97–98 %) достаточно дороги, что существенно сдерживает их широкомасштабное производство и применение. Одной из главных причин, обуславливающих такое положение дел, считается наличие примесей в исходном сырье, которые либо катализируют разложение ферратов [5], либо снижают их концентрацию за счет непосредственного взаимодействия.

Известно, что примеси, содержащиеся в исходных KOH или NaOH, даже в незначительных количествах оказывают существенное влияние на выход и качество целевого продукта, поскольку последние для синтеза ферратов берутся в большом избытке. Следует добавить, что тяжелые металлы вносят наибольший негативный вклад на стабильность соединений Fe(VI), что было впервые показано на примере ускоренного разложения ферратов в присутствии солей кобальта и никеля [5] и в дальнейшем подтверждено для этих и других металлов [6–8].

В этой связи актуальным является поиск путей усовершенствования технологии очистки исходного сырья от соединений тяжелых металлов. При разработке таких технологий необходимо учитывать, что они должны быть

экономически рентабельными и экологически привлекательными, как, например, хорошо известная электрохимическая обработка, эффективность которой была показана в [9] при очистке 50 % растворов NaOH, применяемых для травления кремния в солнечной энергетике.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом данного исследования являются процессы, происходящие при обработке концентрированных растворов гидроксида натрия постоянным электрическим током.

Одной из главных сложностей при удалении примесей тяжелых металлов из щелочных растворов является тот факт, что их, как правило, в системе достаточно много (Fe, Mg, Ni, Zn, Cu, Mn, Pb и др.), а формы их существования различны (оксоанионы, гидроксокомплексы, коллоидные частицы и т. п.). Причем электрохимическое поведение последних в концентрированных щелочных растворах является малоизученным, что, с учетом отсутствия экспериментальных данных по влиянию многих примесей на количественные показатели синтеза соединений Fe(VI), существенно затрудняет разработку технологии электрохимической очистки.

Тем не менее, проведенный технологический аудит и сопоставление его результатов с литературными данными по рассматриваемой тематике [9–11], позволили установить основные факторы, которые оказывают существенное влияние на скорость и полноту извлечения металлов путем электролиза. Очевидно, что главными из них являются: температура электролита, время электролиза, тип применяемых электродов и плотность тока.

3. Цель и задачи исследований

Цель исследования — изучить закономерности очистки концентрированных растворов гидроксида натрия путем электролиза.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Исследовать закономерности удаления примесей тяжелых металлов различной природы из концентрированных щелочных растворов.

2. Выявить зависимость процесса электрохимической очистки от плотности тока.

3. Установить влияние температуры раствора на эффективность процесса очистки.

4. Анализ литературных данных

В некоторых публикациях [1, 11, 12], посвященных получению соединений Fe(VI), особое внимание обращалось на чистоту используемых веществ, в частности гидроксидов щелочных металлов. Ранее было установлено, что основными примесями в гидроксидах щелочных металлов являются неорганические и органические вещества различной природы [1, 11, 12], среди которых наибольший удельный вес имеет карбонат натрия. Среди неорганических анионов, кроме CO_3^{2-} в гидроксидах также присутствуют, но в гораздо меньших количествах: Cl^- , ClO^- , SO_4^{2-} , NO_3^- и др. Технология удаления неорганических анионов из маточного щелочного раствора, основана на различной растворимости солей (карбонатов, хлоридов, нитратов, сульфатов) и гидроксидов натрия (или калия) при низких температурах, что используется при синтезе ферратов [11]. Следует, однако, заметить, что, как правило, неорганические анионы не влияют на практический выход ферратов и их чистоту. Исключением является только анионы CO_3^{2-} и SO_4^{2-} , присутствие которых приводит к загрязнению целевого продукта сульфатами и карбонатами при синтезе ферратов кальция или бария. Поэтому незначительные количества большинства из упомянутых выше анионов, содержащиеся в исходных щелочных растворах, являются вполне допустимыми, а дополнительная технологическая операция вымораживания для синтеза ферратов натрия и калия с экономической точки зрения является нецелесообразной.

Большую опасность по сравнению с вышеуказанными неорганическими анионами представляют примеси органических соединений, на негативную роль которых обращается внимание в [12]. Для их удаления рекомендуется применение таких сильных окислителей как озон, пероксид водорода, ферраты и др. Очевидно, что удалять или разрушать органические примеси следует только в тех случаях, когда они проявляют восстановительные свойства и тем самым могут снижать эффективную концентрацию синтезируемых ферратов. В остальных же случаях предварительную обработку щелочных растворов сильными окислителями можно исключить.

Как было сказано выше, наибольшее негативное влияние на синтез ферратов оказывают примеси соединений тяжелых металлов (СТМ) [1, 7, 8, 12], которые неизбежно присутствуют в исходных гидроксидах. Несмотря на это о специальной очистке от них ранее не сообщалось, а уменьшения концентрации СТМ щелочных растворов достигали, только применяя гидроксиды высшей квалификации чистоты [1, 12]. Однако, для современного уровня получения производных Fe(VI) такого подхода явно недостаточно и для увеличения технологических показателей синтеза ферратов и их качества необходима дополнительная очистка щелочных растворов от СТМ. Последнюю рекомендуется проводить путем обработки концентрированных растворов гидроксида натрия постоянным электрическим током. Об успешном использовании такой обработки, применяе-

мой для глубокой очистки многих растворов, сообщено в работе [9], авторы которой изучили удаление железа и никеля из 50 % растворов NaOH. Несмотря на то, что цитируемая работа посвящена очистке щелочных растворов используемых для модификации поверхности кремния, очевидно, что ее результаты полезны и для ферратных технологий.

Поскольку в [9] изучено только удаление железа и никеля, то целесообразным представляется продолжение исследований, направленных на установление закономерностей очистки и от соединений других металлов.

5. Материалы и методы исследования

Эксперименты проводили в ячейке, изготовленной из полиметилметакрилата с рабочим объемом равным 100 мл. Electroдами служили прямоугольные пластины из платины площадью 12 см². Электрохимической очистке подвергали раствор гидроксида натрия (45 масс. %), имеющий квалификацию чистоты ос. ч. (базовый раствор). Для изучения электрохимической активности и способности к формированию фазовых отложений на электродах некоторых металлов, являющихся традиционными примесями в щелочах, использовали модельные электролиты, приготовленные на основе базового раствора дополнительно содержащего $1 \cdot 10^{-3}$ – $3 \cdot 10^{-2}$ М соединений того или иного металла. Модельные растворы готовили путем введения соответствующих навесок в базовый раствор следующих веществ: ZnO (ос. ч.), PbO (ос. ч.), $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.), $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.), $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.), $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.), Na_2FeO_4 , KMnO_4 (х. ч.), $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (х. ч.), $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.), Na_2CrO_4 (х. ч.).

Регистрацию вольтамперограмм осуществляли с помощью комплекта потенциостата ПИ-50-1.1 в трехэлектродной термостатированной ячейке. Потенциалы рабочих электродов измерены и приведены относительно хлорсеребряного полуэлемента ЭВЛ1-МЗ.1 в насыщенном растворе хлорида калия.

Температуру электролитов в ходе экспериментов задавали и поддерживали с помощью ультратермостата U-4.

Концентрацию оксоаниона FeO_4^{2-} в растворе определяли путем прямого потенциометрического титрования пробы, содержащей соединения Fe(VI) пользуясь методикой, подробно описанной в [13]. Определение тяжелых металлов проводили в соответствии с рекомендациями, приведенными в [9].

Для оценки полноты удаления соединений тяжелых металлов рассчитывали степень удаления α каждого из определяемых металлов. Скорость удаления примесей в процессе электролиза оценивали на основании анализа кинетических зависимостей α от времени. Для удобства пользовались также временем половинного удаления $\tau_{1/2}$, которое равно времени, за которое концентрация примеси снижается в два раза.

6. Результаты исследований

В основе рассматриваемого метода очистки щелочных растворов от примесных металлов под влиянием постоянного электрического тока лежат процессы их электрохимического осаждения на катоде:



Поэтому для металлов, являющихся традиционными примесями в щелочных растворах, была предварительно изучена их способность к электрохимическим превращениям. Об электрохимической активности соединений в концентрированных растворах гидроксида натрия судили по наличию характерных волн на поляризационных зависимостях тока от потенциала, которые свидетельствуют о протекании электрохимических реакций восстановления. Очевидно, что при стационарном электролизе разряд электроактивных частиц происходит на предельном токе, поскольку концентрация их очень мала, а основным процессом является электрохимическое образование водорода:



Типичная катодная вольтамперограмма для модельного раствора, содержащего Fe(III) представлена на рис. 1.

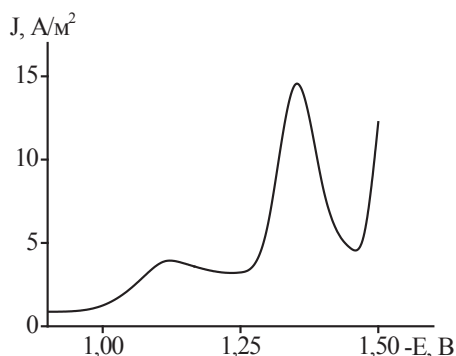


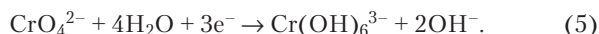
Рис. 1. Кинетика электровосстановления Fe(III) в 45 % растворе NaOH ($T = 298 \text{ K}$; $dE/d\tau = 20 \text{ мВ/с}$)

Как видно, до интенсивного выделения водорода ($\sim 1,5 \text{ В}$) в системе имеют место двухступенчатое восстановление исходных частиц по схеме $\text{Fe(III)} \rightarrow \text{Fe(II)} \rightarrow \text{Fe(0)}$. Если же исходный раствор содержал оксоанион FeO_4^{2-} , то на поляризационной кривой наблюдается еще один катодный процесс $\text{Fe(VI)} \rightarrow \text{Fe(III)}$, что согласуется с литературными данными. Важно добавить, что для обоих случаев конечным продуктом восстановления является неокисленное железо.

Было установлено, что для Al(III) потенциал реакции 3 так и не достигается из-за преимущественного протекания конкурирующей реакции 4.

Как следует из анализа вольтамперных кривых для анионов хрома, представленных на рис. 2, в системе протекают несколько сопряженных электрохимических процессов.

Подъем катодного тока на кривой 2 (пик при потенциале $-0,8 \text{ В}$) свидетельствует о протекании реакции восстановления оксоаниона CrO_4^{2-} до гидроксокомплекса Cr(III):



В свою очередь гексагидроксохромат(III) окисляется на аноде с образованием хромата(VI), о чем свидетельствует рост тока на кривой 3 (пик $\sim 0,2 \text{ В}$). Следует, однако, заметить, что образования металлического хрома в изучаемых условиях не обнаружено, что, естественно, не способствует удалению его из системы.

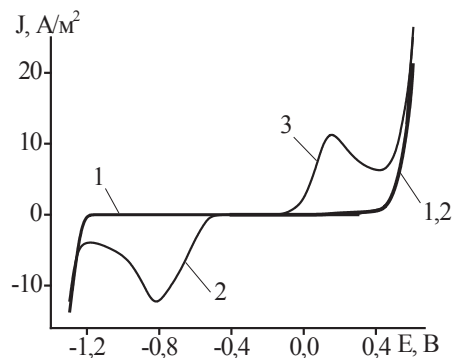


Рис. 2. Потенциодинамические зависимости для анионов хрома в 45 % NaOH: 1 — базовый раствор; 2 — $2,9 \cdot 10^{-2} \text{ M CrO}_4^{2-}$; 3 — $2,9 \cdot 10^{-2} \text{ M [Cr(OH)}_6\text{]}^{3-}$ ($T = 298 \text{ K}$; $dE/d\tau = 20 \text{ мВ/с}$)

В противоположность хрому и алюминию многие из примесных металлов (Fe, Ni, Zn, Sn, Pb и др.), разряжаются на катоде до свободного состояния с образованием металлической фазы, что является основой удаления их из раствора в процессе электролиза. Результаты экспериментов с модельными растворами систематизированы в табл. 1.

Таблица 1

Электрохимические свойства примесных металлов в 45 % растворе NaOH

Металл	Степень окисления	Форма	Электроактивность		Образование Me^0
			Катод	Анод	
Al	+3	$[\text{Al(OH)}_4]^-$	–	–	–
Zn	+2	$[\text{Zn(OH)}_4]^{2-}$	+	–	+
Sn	+2	$[\text{Sn(OH)}_3]^-$	+	+	+
	+4	$[\text{Sn(OH)}_6]^{2-}$	+	–	+
Pb	+2	$[\text{Pb(OH)}_3]^-$	+	+	+
	+4	$[\text{Pb(OH)}_6]^{2-}$	+	–	+
Cr	+3	$[\text{Cr(OH)}_6]^{3-}$	–	+	–
	+6	CrO_4^{2-}	+	–	–
Mn	+6	MnO_4^{2-}	+	+	+
	+7	MnO_4^-	+	–	+
Ni	+2	Ni(OH)_2	+	+	+
Fe	+3	$[\text{Fe(OH)}_4]^-$	+	+	+
	+6	FeO_4^{2-}	+	–	+

В первом приближении можно полагать, что соединения металлов, которые не восстанавливаются на катоде, т. е. в рассматриваемых условиях являются электрохимически инертными, после обработки током так и останутся в растворе в неизменном виде. Подтверждением сказанного являются данные по алюминию (табл. 1), концентрация которого после процедуры очистки остается практически постоянной (рис. 2). Напротив, большинство из изученных металлов, способных к полному электрохимическому разряду, достаточно легко удаляются из раствора за счет образования на катоде отложений преимущественно металлической природы. Однако, как следует из данных, приведенных на рис. 3, скорость и полнота их извлечения существенно различаются.

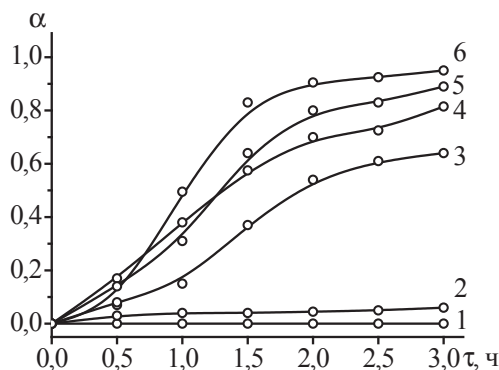


Рис. 3. Зависимость степени извлечения α из 45 % раствора NaOH от времени электролиза τ для разных металлов: 1 — алюминий; 2 — хром; 3 — цинк; 4 — никель; 5 — железо; 6 — свинец ($J = 1000 \text{ A/m}^2$, $T = 333 \text{ K}$)

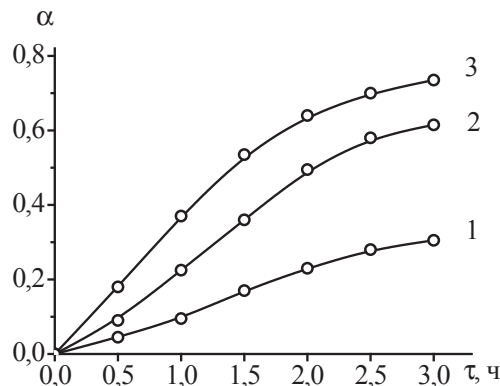


Рис. 5. Зависимость степени извлечения α Ni от времени электролиза τ при температуре: 1 — 293 K; 2 — 313 K; 3 — 333 K. $J = 1000 \text{ A/m}^2$

Влияние такого важного фактора, как плотность тока на примере удаления никеля приведена на рис. 4, из которого следует, что с ростом J величина α также увеличивается. Обнаруженная тенденция имеет место и для других металлов (Fe, Zn, Pb), что находится в качественном согласии с данными работы [9] по очистке от железа и никеля.

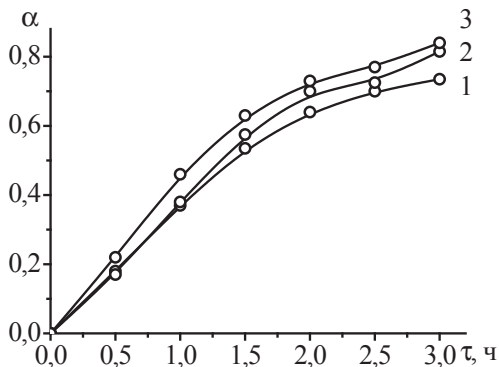


Рис. 4. Зависимость степени извлечения α Ni от времени очистки τ при плотности тока: 1 — 500 A/m^2 ; 2 — 1000 A/m^2 ; 3 — 1500 A/m^2 . $T = 333 \text{ K}$

Наиболее отчетливо прослеживается зависимость полноты удаления от температуры (рис. 5), что вероятно связано с интенсификацией доставки разряжающихся частиц в катодное пространство и уменьшением вязкости электролита.

Подобное влияние температуры на изменение относительной концентрации железа и никеля установлено в [9], авторы которой рекомендуют применение повышенных температур (~100 °C). Последнее, хотя и справедливо, для Fe и Ni, однако может негативно сказаться на извлечении таких достаточно активных амфотерных металлов, как цинк, поскольку в этом случае приходится считаться с ускорением их химического растворения в агрессивной среде. Подтверждением сказанному являются данные по извлечению цинка, приведенные в табл. 2, из которых следует, что скорость удаления для Zn от T проходит через максимум. Поэтому применение очень высоких температур, близких к температуре кипения щелочного раствора, требует дальнейшего обоснования.

Таблица 2

Зависимость времени половинного удаления цинка от температуры

$T, \text{ K}$	293	313	333	353
$\tau_{1/2}, \text{ ч}$	3,64	2,55	1,92	2,98

Важно отметить, что соединения некоторых металлов (Al(III), Zn(II)) практически не оказывают влияния на кинетику разложения ферратов, следовательно, их присутствие в растворе являются допустимым.

В растворах гидроксида натрия, обработанных постоянным электрическим током, зафиксировано существенное уменьшение скорости разложения аниона FeO_4^{2-} (значение константы скорости разложения уменьшается в зависимости от условий электролиза на 1–2 порядка), что подтверждает целесообразность применения предложенного способа очистки от СТМ в технологиях синтеза ферратов.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильной стороной данного исследования является возможность удаления примесей соединений большинства тяжелых металлов, присутствующих в концентрированных щелочных растворах, в ходе их обработки постоянным электрическим током. Указанная технологическая операция является простой по аппаратурному оформлению, экономически доступной и экологически безопасной. Ее эффективность продемонстрирована на примере целого ряда металлов, присутствующих в маточном растворе в различной форме (гидроксокомплексы, оксоанионы, коллоидные частицы).

Weakness. Выполненные эксперименты являются первым шагом на пути к созданию промышленной технологии очистки товарных растворов гидроксида натрия, применяемых для синтеза ферратов. Вместе с тем, для ряда металлов, в частности алюминия и хрома, достигнутая степень извлечения является неудовлетворительной. Следует отметить, что присутствие алюминия практически не влияет на выход и качество получаемых ферратов, а пути более полного удалением хрома требуют дополнительных экспериментов.

Opportunities. Дополнительные возможности по улучшению очистки могут быть реализованы после поиска оптимальных условий, описывающих все многообразие факторов, влияющих на степень удаления примесей.

Threats. Сложности практического применения обусловлены противоречивым влиянием некоторых внешних факторов на степень извлечения примесных металлов. Так, повышение температуры положительно сказывается на удалении большинства из них, кроме цинка, для которого зависимость носит экстремальный характер, что требует тщательного подбора оптимальной температуры электролита.

Таким образом, SWOT-анализ позволяет определить основные пути для эффективной очистки концентрированных щелочных растворов от примесей тяжелых металлов.

8. Выводы

1. Изучены закономерности удаления соединений тяжелых металлов, присутствующих в концентрированном растворе гидроксида натрия. Установлено влияние основных факторов (плотность тока, температура, время электролиза) на степень извлечения и скорость очистки. Показано, что в процессе электролиза большинство изученных примесей (Fe, Ni, Zn, Sn, Pb) способны к полному разряду с образованием фазовых отложений на катоде. Вместе с тем, полнота удаления Cr не превышает 5 %, а алюминий не извлекается вовсе, что обусловлено невозможностью их разряда до Me^0 . Наиболее быстро удаляются из системы свинец, железо и никель.

2. Повышение плотности тока ожидаемо приводит к ускорению процесса электроэкстракции. Установлено, что оптимальное значение J составляет около 1000 А/м².

3. Для большинства металлов повышение температуры ведет к увеличению полноты их удаления из раствора. Установлено, что для цинка зависимость степени извлечения от температуры носит экстремальный характер, что обусловлено его повышенной растворимостью при высоких температурах.

Литература

- Sharma, V. K. Ferrates: Synthesis, Properties, and Applications in Water and Wastewater Treatment [Text] / V. K. Sharma. — ACS Symposium Series, 2008. — 524 p. doi:10.1021/bk-2008-0985
- Yates, B. J. Engineering aspects of ferrate in water and wastewater treatment — a review [Text] / B. J. Yates, R. Zboril, V. K. Sharma // Journal of Environmental Science and Health, Part A. — 2014. — Vol. 49, № 14. — P. 1603–1614. doi:10.1080/10934529.2014.950924
- Gan, W. Investigation of disinfection byproducts formation in ferrate(VI) pre-oxidation of NOM and its model compounds followed by chlorination [Text] / W. Gan, V. K. Sharma, X. Zhang, L. Yang, X. Yang // Journal of Hazardous Materials. — 2015. — Vol. 292. — P. 197–204. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.02.037
- Jiang, J.-Q. Drinking water treatment by in situ generated ferrate(VI) [Text] / J.-Q. Jiang, H. B. P. Durai, R. Winzenbacher, M. Petri, W. Seitz // Desalination and Water Treatment. — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 731–739. doi:10.1080/19443994.2014.938303
- Veprek-Siska, J. Reactions of very pure substances: Decomposition of Manganese(VII), Iron(VI) and Ruthenium(VII) oxyanions in alkaline solution [Text] / J. Veprek-Siska, V. Ettel // Chemistry and Industry. — 1967. — Vol. 1. — P. 548–549.
- Licht, S. Energetic Iron(VI) Chemistry: The Super-Iron Battery [Text] / S. Licht, B. Wang, S. Ghosh // Science. — 1999. — Vol. 285, № 5430. — P. 1039–1042. doi:10.1126/science.285.5430.1039
- Головко, Д. А. Влияние соединений кобальта на устойчивость ферратов(VI) [Текст] / Д. А. Головко, И. Д. Головко // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — № 6/4 (26). — С. 62–66. doi:10.15587/2312-8372.2015.56273
- Головко, Д. А. Влияние соединений хрома на синтез ферратов(VI) щелочных металлов [Текст] / Д. А. Головко // Вос-

точно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — № 3/6 (75). — С. 15–21. doi:10.15587/1729-4061.2015.42634

- Joo, J. Ultrahigh purification in concentrated NaOH by electrowinning for solar cell application [Text] / J. Joo, J. Kim, J. W. Kim, J. D. Ocon, J. K. Lee, W. Chang, J. Lee // Separation and Purification Technology. — 2015. — Vol. 145. — P. 24–28. doi:10.1016/j.seppur.2015.02.011
- Yuan, B. Electrowinning of Iron in Aqueous Alkaline Solution Using a Rotating Cathode [Text] / B. Yuan, O. E. Kongstein, G. M. Haarberg // Journal of The Electrochemical Society. — 2009. — Vol. 156, № 2. — P. 64–69. doi:10.1149/1.3039998
- Chengchun, J. Preparation of Potassium Ferrate by Wet Oxidation Method Using Waste Alkali: Purification and Reuse of Waste Alkali [Text] / J. Chengchun, L. Chen, W. Shichao // ACS Symposium Series. — 2008. — Vol. 985. — P. 94–101. doi:10.1021/bk-2008-0985.ch005
- Delaude, L. A Novel Oxidizing Reagent Based on Potassium Ferrate(VI) [Text] / L. Delaude, P. Laszlo // The Journal of Organic Chemistry. — 1996. — Vol. 61, № 18. — P. 6360–6370. doi:10.1021/jo960633p
- Golovko, D. A. A Simple Potentiometric Titration Method to Determine Concentration of Ferrate(VI) in Strong Alkaline Solutions [Text] / D. A. Golovko, V. K. Sharma, V. I. Suprunovich, O. V. Pavlova, I. D. Golovko, K. Bouzek, R. Zboril // Analytical Letters. — 2011. — Vol. 44, № 7. — P. 1333–1340. doi:10.1080/00032719.2010.511748

ОТРИМАННЯ ОЧИЩЕНИХ РОЗЧИНІВ НАТРИЙ ГІДРОКСИДУ ДЛЯ СИНТЕЗУ ФЕРАТІВ(VI)

Вивчені процеси електрохімічної очистки концентрованих розчинів натрій гідроксиду від домішок важких металів. Встановлено вплив температури, густини струму та тривалості електролізу на ефективність видалення деяких металів. Продемонстровано, що швидкість та повнота очистки для різних металів суттєво різняться. Виявлено залежність між ступенем їх видалення та технологічними показниками синтезу фератів(VI).

Ключові слова: синтез фератів(VI), натрій гідроксид, домішки важких металів, очистка, електроліз.

Головко Дмитрій Аркадьєвич, кандидат хімічних наук, доцент, кафедра технології неорганічних речовин та екології, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна, e-mail: golovkod@mail.ru.

Нефедов Володимир Георгійович, доктор технічних наук, професор, кафедра електрохімічних та природоохоронних технологій, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна.

Головко Ігор Дмитрович, асистент, кафедра аналітичної хімії та хімічної технології харчових добавок та косметичних засобів, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна.

Шевченко Людмила Васильєвна, кандидат хімічних наук, доцент, кафедра фізичної та неорганічної хімії, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Україна.

Головко Дмитро Аркадійович, кандидат хімічних наук, доцент, кафедра технології неорганічних речовин та екології, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна.

Нефедов Володимир Георгійович, доктор технічних наук, професор, кафедра електрохімічних та природоохоронних технологій, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна.

Головко Ігор Дмитрович, асистент, кафедра аналітичної хімії та хімічної технології харчових добавок та косметичних засобів, Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна.

Шевченко Людмила Васильєвна, кандидат хімічних наук, доцент, кафедра фізичної та неорганічної хімії, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Україна.

Golovko Dmitry, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: golovkod@mail.ru.

Nefedov Vladimir, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine.

Golovko Igor, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine.

Shevchenko Ludmila, Dnipropetrovsk National University Olesya Honchara, Ukraine