

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ/METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.6.1>

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ РЕАГЕНТ ДЛЯ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ И ОЧИСТКИ РАСТВОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЦИАНИДЫ

Научная статья

Смирнов С.В.^{1,*}, Киселева Г.В.², Первова И.Г.³¹ORCID : 0009-0001-6042-9795;³ORCID : 0000-0002-1635-8643;^{1, 2, 3}Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (smirnov343[at]yandex.ru)

Аннотация

Реагенты на основе ферратов щелочных металлов предназначены для обезвреживания и очистки сточных вод, содержащих соли циановодородной кислоты и ацидокомплексы цветных и благородных металлов. При использовании реагентов отсутствует вторичное загрязнение растворов, поскольку продуктом восстановления феррат-ионов являются экологически безвредные осадки гидроксида железа(III) и гексацианоферрата(III) железа(II). Обезвреживание токсичных цианидов происходит при их окислении ферратами, а полная очистка растворов от цианидов осуществляется как окислением, так и осаждением в виде гексацианоферратов(III) цветных металлов. В результате сокращается расход железосодержащего реагента по сравнению с традиционными окислителями.

Ключевые слова: цианиды, ферраты, сточные воды, обезвреживание и очистка, гидрометаллургия цветных и благородных металлов.

ENVIRONMENTALLY SAFE REAGENT FOR NEUTRALISING AND PURIFYING SOLUTIONS CONTAINING CYANIDES

Research article

Smirnov S.V.^{1,*}, Kiseleva G.V.², Pervova I.G.³¹ORCID : 0009-0001-6042-9795;³ORCID : 0000-0002-1635-8643;^{1, 2, 3}Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (smirnov343[at]yandex.ru)

Abstract

Reagents based on alkali metal ferrates are designed for the neutralisation and purification of wastewater containing hydrocyanic acid salts and acid complexes of non-ferrous and precious metals. When using these reagents, there is no secondary contamination of solutions, since the recovery product of ferrate ions is environmentally friendly iron(III) hydroxide and iron(II) hexacyanoferrate(III) precipitates. Toxic cyanides are neutralised by their oxidation with ferrates, and complete purification of solutions from cyanides is carried out by both oxidation and precipitation in the form of hexacyanoferrates(III) of non-ferrous metals. As a result, the consumption of iron-containing reagents is reduced compared to traditional oxidants.

Keywords: cyanides, ferrates, wastewater, neutralisation and purification, hydrometallurgy of non-ferrous and precious metals.

Введение

Цианиды и цианокомплексы металлов широко применяются в гидрометаллургии и в технологиях обработки металлических изделий. Например, цианиды натрия и калия применяются для извлечения из руд благородных металлов (главным образом золота и серебра [1]) и в процессах цианирования стали для повышения поверхностной твердости и износостойкости [2]. Цианиды входят в состав технологических растворов при серебрении, платинировании, цинковании, меднении и получении других металлических покрытий химическими и электролитическими методами [3]. В основе перечисленных технологий лежит способность анионов циановодородной кислоты образовывать прочные комплексы с катионами цветных металлов.

По данным исследования рынка цианида натрия в России с прогнозом 2027 [4], проведенного маркетинговым агентством Роиф Эксперт в 2023 году, объем российского производства цианида натрия за пять лет вырос на 24%. Поскольку не имеется альтернативы цианированию при добыче золота, повышении прочности стали и получении качественных гальванопокрытий, следует ожидать, что объем производства цианосодержащих препаратов будет увеличиваться.

Циановодородная (синильная) кислота HCN и ее производные относятся к чрезвычайно токсичным веществам. Сырьем для получения цианосодержащих препаратов являются NaCN и KCN, получаемые нейтрализацией синильной кислоты соответствующими щелочами. Технологии цианидов натрия и калия, учитывая масштабы производства, являются основным источником эмиссии в окружающую среду токсичных выбросов и сбросов [5].

Как получение NaCN и KCN, так и их использование в производстве связаны с реакциями обмена и комплексообразования в водных растворах. Образующиеся при проведении технологических операций отработанные технологические растворы и промывные воды, содержащие свободные или связанные в комплексы цианид-ионы,

характеризуются высокой токсичностью. Кроме того, водные растворы являются источником высокотоксичных летучих циановодорода HCN и циана (CN)₂.

Очистка растворов от цианидов может быть осуществлена физико-химическими методами (электролиз, ионный обмен и др. [6]), требующими, однако, повышенных затрат. Большинство методов очистки сточных вод от CN⁻ производится реагентами-окислителями, такими как озон, пероксид водорода, жидкий хлор, хлорная известь, гипохлорит натрия, диоксид или перманганат калия. Например, сточные воды производства цианида натрия, являющиеся одним из основных источников эмиссии токсичных веществ в окружающую среду, подвергаются гипохлоритной очистке [5]. Небольшое число реагентов используют способность полярных цианид-ионов образовывать малорастворимые соединения с переходными металлами. Осадки простых цианидов (CuCN, AgCN) или комплексного гексацианоферрата(III) железа(II) отделяются от воды отстаиванием или фильтрованием.

В данной работе приводятся результаты исследования процессов очистки и обезвреживания водорастворимых солей и комплексных соединений, содержащих цианид-ионы, реагентами на основе соединений четырех- и шестивалентного железа. Основное их преимущество заключается в экологической безопасности, поскольку продуктом восстановления ферратов является экологически безвредный объемный осадок гидроксида железа(III), дополнительно участвующий в процессах осветления растворов. За рубежом для обезвреживания растворов используется феррат(VI) калия, но из-за низкой устойчивости во влажном воздухе его применение ограничено. Исследованный в данной работе реагент ФЕРНЕЛ сохраняет окислительную активность длительное время, в результате чего он может храниться и транспортироваться на большие расстояния.

Актуальность работы связана с защитой окружающей природной среды от высокотоксичных примесей и возрастающим потреблением цианидов. Целью настоящей работы являлось изучение возможности замены реагентов, предназначенных для обезвреживания и очистки водных растворов от цианидов и вызывающих вторичное загрязнение воды продуктами их восстановления, на экологически безопасные реагенты, имеющие в составе соединения железа с высокими степенями окисления. Критерием эффективности предлагаемых реагентов является отсутствие в обезвреженных растворах новых примесей, концентрация которых превышает нормативные значения концентраций, установленных для данного типа вод. Основная задача исследований направлена на изучение расхода железосодержащих реагентов при обезвреживании растворов, содержащих цианид-ионы и цианокомплексы с катионами меди и цинка, путем перевода цианидов в практически безвредные цианаты или осадки гексацианоферратов(III) переходных металлов. В качестве дальнейшего продолжения работ предполагаются исследования процессов обезвреживания цианидов железосодержащими реагентами с участием широкого перечня переходных металлов, а также полная очистка растворов, связанная с разложением цианатов.

Методы и принципы исследования

При проведении исследований использовался предоставленный ООО УПЕК (г. Екатеринбург) реагент-окислитель ФЕРНЕЛ (ТУ 214000-001-56974547-2009). Этот реагент сочетает окислительные свойства ферратов(IV) и ферратов(VI) [7], [8]. Массовая доля окислителей в реагенте составляла 36% в пересчете на K₂FeO₄. ФЕРНЕЛ растворяется в воде при любых температурах и может использоваться для обработки поверхностных и сточных вод, как в обогреваемых помещениях, так и на открытом воздухе. Входящие в его состав щелочные компоненты повышают устойчивость продуктов в атмосферных условиях, а также позволяют полностью исключить из технологии очистки сточных вод соответствующие реагенты (например, соду). Высокая устойчивость реагента по сравнению с чистыми K₂FeO₄ и Na₂FeO₄ позволяет хранить, накапливать его и транспортировать любыми видами транспорта.

Применение реагентов-окислителей может проводиться однократно до полной очистки, либо через стадию обезвреживания с дальнейшим разложением продуктов окисления. Количество электронов при окислении одного иона CN⁻ и фактор эквивалентности (таблица) показывают, что стехиометрический расход окислителя при полной очистке растворов в 2,5 раза больше расхода, требующегося для обезвреживания высокотоксичных цианидов путем перевода их в цианаты. В связи с этим в большинстве случаев реагентная очистка сточных вод от цианидов осуществляется через стадию обезвреживания с дальнейшим разложением образующихся цианатов путем гидролиза или пиролиза.

Таблица 1 - Исходные данные для оценки расхода реагента-окислителя

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.6.1.1>

	Полная очистка	Обезвреживание с доочисткой
Окисление CN ⁻	до CO ₂ и N ₂	до цианатов NCO ⁻
Количество электронов при окислении одного иона CN ⁻	- 5 e ⁻	- 2 e ⁻
Фактор эквивалентности CN ⁻ (f _{CN})	1/5	1/2
Доочистка раствора	не требуется	цианаты щелочных металлов гидролизуются с образованием карбонатов, NH ₃ и CO ₂

Водорастворимые продукты окисления производных циановодородной кислоты и применяемых окислителей зависят от состава растворов и условий проведения реакций. При использовании в качестве окислителей гипохлоритов щелочных и щелочноземельных металлов или хлорной воды происходит вторичное загрязнение растворов продуктами

восстановления хлора (преимущественно хлоридами). Например, $2\text{CN}^- + 5\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} = 2\text{HCO}_3^- + 5\text{Cl}^- + \text{N}_2$. Если в качестве реагентов выступают перманганат калия или оксид марганца(IV), продуктами восстановления являются манганаты или цианокомплексы марганца(II). Например, $2\text{MnO}_4^- + \text{CN}^- + 2\text{OH}^- = \text{NCO}^- + 2\text{MnO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ или

$\text{MnO}_2 + 7\text{CN}^- + \text{H}_2\text{O} = \text{NCO}^- + [\text{Mn}(\text{CN})_6]^{4-} + 2\text{OH}^-$. Проблемы вторичного загрязнения могут возникнуть и при озонировании, которое в настоящее время считается одним из наиболее эффективных методов обеззараживания и очистки сточных вод (например, некоторые типы пестицидов при окислении образуют сверхтоксичные продукты, которые не поддаются дальнейшему разрушению озоном и другими реагентами).

Поскольку большинство реагентных методов очистки связано с применением гипохлоритов натрия или кальция, дальнейшее рассмотрение экологически безвредных окислителей на основе соединений железа сравнивается с окислителями на основе соединений хлора. Заменена традиционных окислителей ферратами щелочных металлов со степенями окисления железа четыре и шесть исключает вторичное загрязнение продуктами восстановления железа.

Стандартные значения электродных потенциалов процессов окисления токсичных цианосодержащих соединений лежат в достаточно широком интервале значений от -0,76 В до +0,37 В. Более сильные восстановительные свойства цианид-ионы проявляют в щелочной среде. Значения электродных потенциалов феррат(VI)-ионов (рис. 1) превышают интервал электродных потенциалов CN^- даже в щелочных растворах, в которых окислительная способность ферратов снижается. Таким образом, феррат(VI)-анион выступает в качестве окислителя соединений, содержащих цианиды, практически при любых условиях, сопровождающих процессы очистки водных растворов.

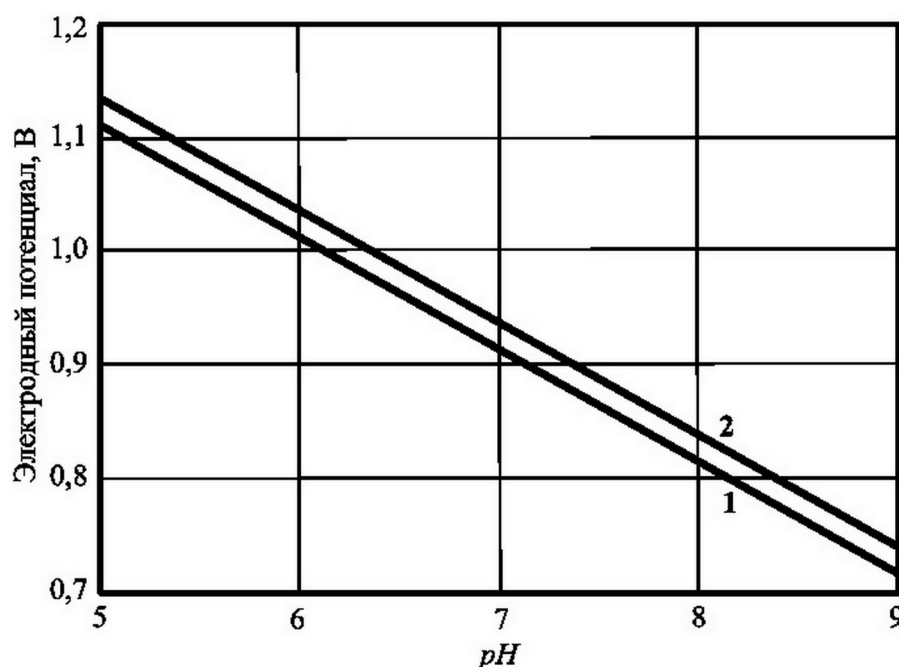
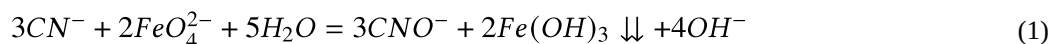


Рисунок 1 - Расчетные зависимости электродных потенциалов феррат(VI)-ионов при восстановлении до катионов дигидроксижелеза(III) (1) и гидроксижелеза(III) (2) от pH
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.6.1.2>

Примечание: концентрации дигидроксижелеза(III) и гидроксижелеза(III) определялись значениями произведения растворимости $\text{Fe}(\text{OH})_3$, а равновесная концентрация феррат(VI)-аниона принималась стандартной 1 моль·дм⁻³

Продуктом восстановления железа(VI) при окислении цианид-ионов является объемный осадок гидроксида железа(III), обеспечивающий дополнительное осветление растворов:



Сравнение расхода реагентов-окислителей на основе соединений железа и хлора осуществлялось стехиометрическими расчетами с использованием приложения Mathcad. При обезвреживании высокотоксичных цианид-ионов путем окисления до цианатов (таблица) фактор эквивалентности f_{CN} равен 1/2 как при использовании ферратов, так и хлорсодержащих окислителей (например, гипохлоритов):

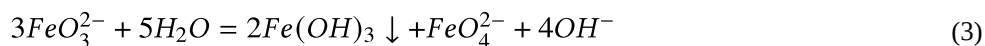


Фактор эквивалентности феррат(VI)-ионов при восстановлении до железа(III) равен 1/3, тогда как для гипохлоритов $f_{\text{ClO}} = 1/2$. Таким образом, ферраты(VI) калия или натрия окисляют в полтора раза больше

цианидов ($[CN^-] : [FeO_4^{2-}] = 1,5$) по сравнению с эквимольным расходом гипохлорита натрия ($[CN^-] : [ClO^-] = 1,0$).

В качестве промежуточного продукта в реакции (1) при окислении цианидов образуются сравнительно прочные анионы гексацианожеелеза(III) (логарифм константы устойчивости $[Fe(CN)_6]^{3-}$ составляет 43,9). Авторы работы [9] показали, что образование этих анионов дополнительно обеспечивает очистку водных растворов от цианид-ионов и катионов металлов 3d-ряда путем осаждения комплексных соединений типа $Met_3[Fe(CN)_6]_2$, где $Met = Fe, Cu$ или Zn .

Альтернативой окислителю на основе шестивалентного железа являются соединения железа со степенью окисления +4. Высокая окислительная способность ферратов(IV) щелочных металлов связана с реакцией диспропорционирования при их растворении в воде, в результате которой образуются феррат(VI)-ионы, являющиеся более сильными окислителями:



Таким образом, реагенты, содержащие ферраты(IV) щелочных металлов, могут оказывать такое же действие, как и окислители, содержащие соединения железа(VI). Получение реагента на основе ферратов(IV) натрия и калия [10] требует меньших затрат энергии по сравнению с реагентом на основе ферратов(VI) натрия и калия [11]. Реагенты, содержащие $NaKFeO_3$ более устойчивы при хранении в атмосферных условиях по сравнению с $NaKFeO_4$, но их расход возрастает в три раза, поскольку фактор эквивалентности для них равен единице, по сравнению со значением 1/3 для фактора эквивалентности ферратов(VI) щелочных металлов.

Основные результаты

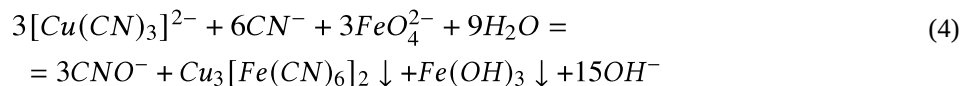
Для определения расхода реагентов-окислителей, в которых присутствуют соединения железа как со степенями окисления +6, так и +4, были исследованы два вида растворов, содержащих цианид-ионы и ацидокомплексы цинка и меди с цианид-ионами. Первый вид представлял сбросы технологических растворов и промывных вод. Отработанные электролиты цинкования содержали $25 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$ цинка (в пересчете на ZnO), до $45 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$ $NaCN$ (общ.) и до $80 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$ $NaOH$. Общая концентрация цианидов в промывных водах колебалась в интервале $0,6\text{—}1,0 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3} CN^-$. Второй тип исследованных растворов — это искусственная модельная система, которая имитировала основные компоненты отработанных растворов, применяемых в технологии химического меднения. Состав модельного раствора отвечает тетрацианокупрат(I)-аниону, устойчивость которого обеспечивается избытком цианида натрия: $c_{Cu(I)} = 137 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$; $c_{CN} = 1,1 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$; $pH=8,4$.

Остаточные концентрации компонентов определялись после обработки проб растворов реагентом ФЕРНЕЛ. При высоких остаточных концентрациях примесей анализируемые пробы разбавлялись. Содержание цианидов измерялось фотометрическим методом по ГОСТ 31863-2012 «Вода питьевая. Методы определения содержания цианидов». Определение остаточных концентраций меди и цинка осуществлялось атомно-абсорбционным методом по ПНД Ф 14.1:2.4.139-98 «Методика измерений массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектроскопии».

Обработка проб сточных вод и модельных растворов осуществлялась ступенчато заданными порциями поликристаллического реагента ФЕРНЕЛ до полного его растворения. При этом ФЕРНЕЛ использовался в качестве реагента для обезвреживания растворов, окисляя CN^- до производных циановой кислоты. Окончательное количество реагента выбиралось таким, чтобы остаточная концентрация цианид-ионов не превышала ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, равного $0,05 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$.

Наряду с окислительным разложением цианидов удаление CN^- из растворов происходит в результате образования осадков. Гексацианоферрат(III)-ионы, образованные катионами Fe^{3+} (продуктами восстановления ферратов) и анионами CN^- , осаждаются катионами цинка и меди(II) в виде комплексных соединений $Zn_3[Fe(CN)_6]_2$ и $Cu_3[Fe(CN)_6]_2$. Одновременно содержащиеся в ФЕРНЕЛе щелочные агенты частично осаждают катионы цинка и меди(II) в виде гидроксидов $Zn(OH)_2$ и $Cu(OH)_2$.

Принципиальное отличие очистки медьсодержащих сбросов от сточных вод технологии оцинкования заключается в дополнительном расходе реагента ФЕРНЕЛ на окислении ацидокомплексов меди(I) до меди(II) феррат(VI)-ионами:



Стехиометрическое уравнение (4) для процессов, протекающих при обезвреживании и очистке модельного раствора от меди и цианидов показывает, что на 15 молей цианид-ионов, шесть из которых присутствуют в растворе и девять входят в состав трицианокупрата(I), расходуется 3 моля феррат(VI)-ионов. Отметим, что при аналогичном обезвреживании цианидов гипохлоритом кальция, который обеспечивает только их окисление до цианатов, стехиометрический расход гипохлорит-ионов составляет 15 моль. Иными словами, количественный расход окислителей, содержащихся в реагенте ФЕРНЕЛ, при удалении цианид-ионов из сточных вод в 7,5 раза меньше стехиометрического расхода окислителей на основе хлора. Следует отметить, что одновременно с образованием $Cu_3[Fe(CN)_6]_2$ возможно осаждение $Cu(OH)_2$. Поскольку в источниках отсутствуют термодинамические данные, характеризующие растворимость гексацианоферратов(III) металлов 3d-ряда, количественно рассчитать равновесные концентрации ионов и оценить вероятность протекания отдельных реакций в настоящее время не возможно.

Обсуждение

Аналитически определяемое уменьшение содержания CN^- в модельном растворе (рис. 2) начинается с дозы феррат(VI)-ионов, равной $3,6 \text{ ммоль} \cdot \text{дм}^{-3}$ ($2 \text{ г} \cdot \text{дм}^{-3}$ реагента ФЕРНЕЛ). Первые порции реагента расходуются на

окисление цианоккомплексов меди(I), продуктом разложения которых является осадок гидроксида меди(II). Восстановленное из реагента железо(III), накапливается в растворе в виде гексацианоферрат(III) ионов. При более высоких дозах реагента характер протекающих реакций изменяется. Изломы на зависимостях концентрации меди и pH от дозы реагента также указывают на изменение характера протекающих реакций.

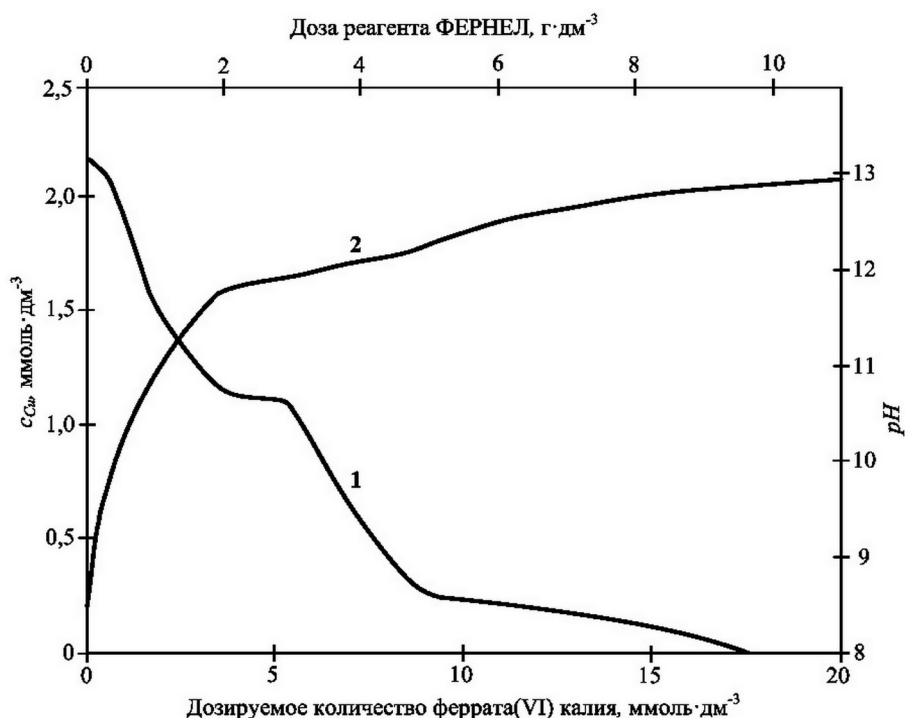


Рисунок 2 - Изменения концентрации меди (1) и pH (2) в зависимости от дозы реагента ФЕРНЕЛ при обработке 1 дм³ модельного раствора

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.6.1.3>

В диапазоне $3,7 \div 5,4$ ммоль·дм⁻³ FeO_4^{2-} наблюдается резкое уменьшение концентрации цианид-ионов, связанное с осаждением гексацианоферрата(III) меди(II). Практически полное обезвреживание цианид-ионов наблюдается при дозируемом количестве феррат(VI)-ионов $13,6$ ммоль·дм⁻³, что соответствует дозе реагента $7,5$ г·дм⁻³. Далее при увеличении дозы ФЕРНЕЛа происходит разложение цианатов с образованием карбонатов металлов, азота и гидроксида железа(III).

В отличие от электролитов меднения, при обезвреживании которых часть окислителя расходуется на взаимодействие с медью(I), при обезвреживании электролитов оцинкования реагент ФЕРНЕЛ расходуется только на окисление цианид-ионов. Суммарное стехиометрическое уравнение процессов, протекающих при обезвреживании и очистке сбросов отработанных цинковых электролитов от цинка и цианидов показывает, что 2 моля FeO_4^{2-} обеспечивают обезвреживание (окисление) и очистку (осаждение) от 12 моль цианид-ионов. Таким образом, реагент ФЕРНЕЛ в два раза эффективнее традиционных окислителей на основе соединений хлора, которые обеспечивают только обезвреживание растворов.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что реагент ФЕРНЕЛ обеспечивает как обезвреживание высокотоксичных цианид-содержащих сточных вод, так и полную их очистку. Обезвреживание растворов осуществляется путем окисления цианидов до производных менее токсичной циановой кислоты. С увеличением дозы реагента происходит полное разложение цианидов с выделением углекислого газа и азота.

Эффективность обезвреживания реагентом ФЕРНЕЛ растворов, содержащих CN^- , повышается в присутствии катионов цинка или меди(II), которые обеспечивают дополнительную очистку сточных вод в результате осаждения гексацианоферратов(III) этих металлов. Если обработке реагентом ФЕРНЕЛ подвергаются сточные воды, содержащие только свободные цианид-ионы, для сокращения расхода реагента и повышения эффективности очистки могут быть использованы добавки сбросов, содержащих водорастворимые соединения двухвалентных переходных металлов, которые образуют осадки с гексацианоферрат(III)-анионами. В растворах, не содержащих катионов цветных металлов, также может наблюдаться осаждение цианоккомплексов $Fe_3[Fe(CN)_6]_2$, если в составе сбросов имеются примеси, приводящие к образованию катионов Fe^{2+} .

Замена традиционных окислителей цианидов на реагент ФЕРНЕЛ не только снижает расход окислителя, но также является экологически целесообразной, поскольку продукты восстановления содержащихся в реагенте соединений железа представляют безвредные осадки, отделяемые от растворов фильтрованием или отстаиванием.

В первую очередь реагент ФЕРНЕЛ может быть рекомендован для обезвреживания технологических растворов гальванических участков (отработанных электролитов и промывных вод), содержащих катионы цветных металлов

(Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Cd^{2+}), которые осаждаются в составе гексацианоферратов(III). Так, в 2012 г. реагент был успешно применен ООО УПЕК для обезвреживания накопившихся высокотоксичных отработанных растворов участка электрохимического цинкования деталей ООО «АМУР» (г. Новоуральск).

Высокотоксичные цианидсодержащие растворы после обезвреживания реагентом ФЕРНЕЛ содержат водорастворимые цианаты калия и натрия. Эти растворы самопроизвольно очищаются под действием факторов окружающей среды, поскольку цианат-ионы в щелочном растворе постепенно полностью гидролизуются с выделением углекислого газа и азота. Скорость разложения цианат-ионов увеличивается при небольшом нагревании. Повышение температуры обезвреженного раствора происходит, например, если на заключительной стадии очистки производится электрокоагуляционная обработка. Продуктом очистки сточных вод является щелочной раствор гидроксидов калия и натрия.

Образующиеся при использовании реагента ФЕРНЕЛ осадки могут быть обезврежены пиролизом, в процессе которого содержащиеся в составе комплексных соединений цианид-ионы окисляются до углекислого газа и азота.

Благодарности

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО «УПЕК» (г. Екатеринбург) А.М. Халемскому.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the General Director of UPEC LLC (Yekaterinburg) A.M. Khalemsky.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Халемский А.М. Способ извлечения золота и серебра из материала, содержащего цветные металлы и железо : пат. 2109826 РФ, МПК С 22 В 11/00, 11/08 / А.М. Халемский, С.А. Паюсов, С.А. Кадников [и др.]; заявитель и патентообладатель А.М. Халемский. — № 9510050602; заявл. 1995-01-12; опубл. 1998-04-27. — 8 с.
2. Гадалов В.Н. Использование цианирования для улучшения структуры и свойств конструкционной стали 30ХГТ / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, О.А. Бредихина [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. — Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2012. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-tsianirovaniya-dlya-uluchsheniya-struktury-i-svoystv-konstruktsionnoy-stali-30hgt/viewer> (дата обращения: 09.04.25).
3. РД 50-664-88. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы приготовления и корректирования электролитов : методические указания. — Введ. 1989-07-01. — Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. — 127 с.
4. Рынок цианида натрия в России, анализ развития // Маркетинговое агентство ROIF Expert. Исследование рынков. — 2025. — №4. — URL: <https://roif-expert.ru/analizu-rynkov-himicheskoy-promyshlennosti/soli-peroksosoli/rynok-tsianida-natriya/rynok-tsianida-natriya-v-rossii-issledovanie-i-prognoz.html> (дата обращения: 09.04.25).
5. ИТС 33-2020. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство специальных неорганических химикатов. — Введ. 2021-07-01. — Москва : Бюро НТД, 2020. — 132 с.
6. Бикетова Л.В. Разработка оптимальной технологии очистки сточных вод рафинировочного производства драгоценных металлов / Л.В. Бикетова, Ю.Н. Лисаков, С.Д. Ершов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технология. — 2016. — № 9 (5). — С. 703–713.
7. Кнунянц И.Л. Фенолы // Химическая энциклопедия : в 5 т. / И.Л. Кнунянц. — Москва : Советская энциклопедия, 1990. — Т. 5. — 783 с.
8. Перфильев Ю.Д. Новая ферратная технология очистки воды / Ю.Д. Перфильев, Л.А. Куликов, С.К. Дедушенко // Водные ресурсы для любой страны. Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. — 2024. — URL: https://www.kge.msu.ru/ozone/archives/1rus_conf_pr/Presentations/Perfiliev.pdf (дата обращения: 09.04.25).
9. Ходяшев Н.Б. Закономерности обезвреживания концентрированных циансодержащих сточных вод гальванических производств с получением пигментных материалов на основе смешанных гексацианоферратов переходных металлов / Н.Б. Ходяшев, И.С. Глушанкова, Г.А. Старков // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 11–5. — С. 1254–1260.
10. Халемский А.М. Способ получения феррата-4 натрия : пат. 2149833 РФ, МПК С 01 G 49/00 / А.М. Халемский, С.А. Паюсов; заявитель и патентообладатель А.М. Халемский. — № 98116849; заявл. 1998-09-04; опубл. 2000-05-27. — 9 с.
11. Халемский А.М. Способ получения окислителя на основе ферратов щелочных металлов и установка для его осуществления : пат. 2381180 РФ, МПК С 01 G 49/00. / А.М. Халемский, С.В. Смирнов, Л. Келнер; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Урал Процесс Инжиниринг Компания» (УПЕК). — № 2007137241; заявл. 2007-10-08; опубл. 2010-02-10. — 37 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Khalemsky A.M. Sposob izvlecheniya zolota i serebra iz materiala, soderzhashchego tsvetnie metalli i zhelezo [Method of extracting gold and silver from material containing non-ferrous metals and iron] : pat. 2109826 Russian Federation, IPC C 22 B 11/00, 11/08 / A.M. Khalemsky, S.A. Payusov, S.A. Kadnikov [et al.]; the applicant and the patentee A.M. Halemsky. — № 9510050602; appl. 1995-01-12; publ. 1998-04-27. — 8 p. [in Russian]
2. Gadalov V.N. Ispolzovanie tsianirovaniya dlya uluchsheniya strukturi i svoystv konstruktsionnoi stali 30KhGT [The usage of cyanidation to improve the structure and properties of the constructional 30ChMnTi steel] / V.N. Gadalov, V.G. Salnikov, O.A. Bredikhina [et al.] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Kazan State Energy University]. — Kazan : Kazan State Power Engineering University, 2012. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-tsianirovaniya-dlya-uluchsheniya-struktury-i-svoystv-konstruktsionnoy-stali-30hgt/viewer> (accessed: 09.04.25). [in Russian]
3. RD 50-664-88. Pokritiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Metodi prigotovleniya i korrektsirovaniya elektrolitov [RD 50-664-88. Metallic and non-metallic inorganic coatings. Methods of preparation and correction of electrolytes] : guidelines. — Introd. 1989-07-01. — Moscow : USSR State Committee on Standards, 1989. — 127 p. [in Russian]
4. Rinok tsianida natriya v Rossii, analiz razvitiya [Sodium Cyanide Market in Russia, Development Analysis] // Marketingovoe agentstvo ROIF Expert. Issledovanie rynkov [ROIF Expert Marketing Agency. Market research]. — 2025. — №4. — URL: <https://roif-expert.ru/analizy-rynkov-himicheskoy-promyshlennosti/soli-peroksoisoli/rynok-tsianida-natriya/rynok-tsianida-natriya-v-rossii-issledovanie-i-prognoz.html> (accessed: 09.04.25). [in Russian]
5. ITS 33-2020. Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnim tekhnologiyam. Proizvodstvo spetsialnykh neorganicheskikh khimikatov [ITS 33-2020. Information and technical reference on the best available technologies. Production of special inorganic chemicals] — Introd. 2021-07-01. — Moscow : Byuro NTD, 2020. — 132 p. [in Russian]
6. Biketova L.V. Razrabotka optimalnoi tekhnologii oчитki stochnykh vod rafinirovannogo proizvodstva dragotsennykh metallov [Development of the optimal wastewater treatment technologies refining of precious metals] / L.V. Biketova, Yu.N. Lisakov, S.D. Yershov // Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya tekhnika i tekhnologiya [Journal of Siberian Federal University. Machinery and Technology Series]. — 2016. — № 9 (5). — P. 703–713. [in Russian]
7. Knunyants I.L. Fenoli [Phenols] // Himicheskaya entsiklopediya [Chemical Encyclopedia] : in 5 vol. / I.L. Knunyants. — Moscow : Sovetskaya entsiklopediya, 1990. — Vol. 5. — 783 p. in Russian]
8. Perfilov Yu.D. Novaya ferratnaya tekhnologiya oчитki vodi [New ferrate water treatment technology] / Yu.D. Perfilov, L.A. Kulikov, S.K. Dedushenko // Vodnye resursy dlya lyuboy strany. Himicheskij fakul'tet MGU im. M.V. Lomonosova [Water resources for any country. Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University]. — 2024. — URL: https://www.kge.msu.ru/ozone/archives/1rus_conf_pr/Presentations/Perfilev.pdf (accessed: 09.04.25). [in Russian]
9. Hodyashev N.B. Zakonomernosti obezvezhivaniya kontsentrirrovannykh tsiansoderzhashchikh stochnykh vod galvanicheskikh proizvodstv s polucheniem pigmentnykh materialov na osnove smeshannykh geksatsianoferratov perekhodnykh metallov [Patterns of neutralization of concentrated cyanide-containing wastewater from galvanic production with production of pigment materials based on mixed transition metal hexacyanoferrates] / N.B. Hodyashev, I.S. Glushankova, G.A. Starkova // Fundamentalnie issledovaniya [Basic Research]. — 2012. — № 11–5. — P. 1254–1260. [in Russian]
10. Khalemsky A.M. Sposob polucheniya ferrata-4 natriya [Sodium ferrate-4 production method] : pat. 2149833 Russian Federation, IPC C 01 G 49/00 / A.M. Khalemsky, S.A. Payusov; the applicant and the patentee A.M. Khalemsky. — № 98116849; appl. 1998-09-04; publ. 2000-05-27. — 9 p. [in Russian]
11. Khalemsky A.M. Sposob polucheniya okislitel'nykh na osnove ferratov shchelochnykh metallov i ustanovka dlya yego osushchestvleniya [Method of producing oxidant based on alkali metal ferrates and apparatus for realising said method] : pat. 2381180 Russian Federation, IPC C 01 G 49/00. / A.M. Khalemsky, S.V. Smirnov, L. Kelner; the applicant and the patentee Ural Process Engineering Company Limited Liability Company (UPEC). — № 2007137241; appl. 2007-10-08; publ. 2010-02-10. — 37 p. [in Russian]