

УДК 669.213:669.2./8.046.8
DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-34-43

КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА КИСЛЫХ РУДНИЧНЫХ ВОД ГОРНО-РУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

TO THE QUESTION OF COMPLEX PROCESSING OF ACID MINING WATER OF MINING ENTERPRISES



Н. Л. Медяник,
Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск
medyanikmagnitka@mail.ru

N. Medyanik,
Magnitogorsk State Technical
University named after G. I. Nosov,
Magnitogorsk



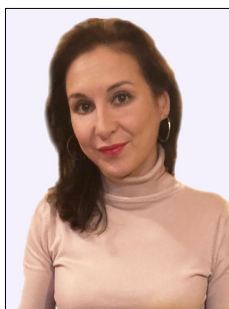
О. А. Мишурина,
Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск
olegro74@mail.ru

O. Mishurina,
Magnitogorsk State Technical
University named after G. I. Nosov,
Magnitogorsk



Э. Р. Муллина,
Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск
e.mullina@inbox.ru

E. Mullina,
Magnitogorsk State Technical
University named after G. I. Nosov,
Magnitogorsk



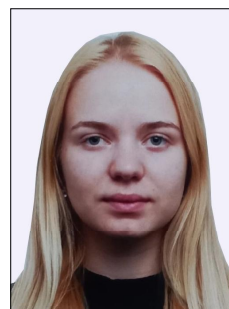
Ю. А. Бессонова,
Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г. И. Носова, Магнитогорск
u.bessonova @inbox.ru

Yu. Bessonova,
Magnitogorsk State Technical
University named after G.I. Nosov,
Magnitogorsk



К. А. Дмитриева,
Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г. И. Носова, Магнитогорск
Saule-p75@mail.ru

K. Dmitrieva,
Magnitogorsk State Technical
University named after G.I. Nosov,
Magnitogorsk



В. Ю. Арзамасцева,
Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г. И. Носова, Магнитогорск
valeriya_kozhokar@mail.ru

V. Arzamastseva,
Magnitogorsk State Technical
University named after G.I. Nosov,
Magnitogorsk

Рассматриваются актуальные аспекты стадийной катионоselectивной переработки техногенных кислых стоков, образующихся на территории горных предприятий, занимающихся разработкой руд медноколчеданного комплекса. Представлена характеристика объекта исследований – кислых рудничных вод горно-рудных предприятий медно-колчеданного комплекса. Дан анализ существующих методов очистки техногенных стоков от катионов металлов (меди, марганца, железа и цинка). Представлены результаты кислотно-основного осаждения поликатионных растворов. Дан анализ преимуществ и недостатков используемых технологий переработки и очистки техногенных образований горно-рудных предприятий. Проанализирована возможность селективной переработки исследуемых кислых рудничных вод с целью их глубокой очистки и получения кондиционных металлосодержащих продуктов. Предложен комплекс методов стадийной эффективной и селективной очистки кислых рудничных вод. Представлены результаты экспериментальных исследований цементации ионов меди. Рассмотрено влияние основных параметров процесса цементации на качество очистки поликомпонентных растворов. Приведены результаты факторного анализа кислотно-основного осаждения катионов железа. Приведены результаты экспериментальных исследований, обосновывающие технологическую целесообразность полного перевода железа в трехвалентную форму с применением метода окислительно-восстановительного осаждения. Представлены результаты анализа эффективности применения окислительно-восстановительного процесса для селективного осаждения ионов Mn^{2+} растворами активного хлора. Сделаны выводы об экологической и технологической эффективности применения рассмотренного комплекса методов катионоselectивной очистки кислых техногенных рудничных вод. *Актуальность исследований* заключается в острой необходимости разработки инновационных технологий комплексной селективной переработки техногенных гидроминеральных образований горно-рудных предприятий, обеспечивающих наряду с предотвращением сброса токсичных стоков в природные водоемы значительное повышение эффективности использования природных минеральных ресурсов. *Цель исследования* – рассмотрение эффективных способов селективной очистки техногенных вод, характеризующихся высоким содержанием ионов цинка, меди, железа и марганца, с целью их комплексной переработки и возможностью получения высококондиционных металлосодержащих продуктов. *Объект исследования* – кислые рудничные воды горнопромышленных предприятий медно-колчеданного комплекса Южного Урала. *Предмет исследования* – технологическая возможность катионоselectивной переработки кислых рудничных вод горнопромышленных предприятий медно-колчеданного комплекса с высоким содержанием ионов меди, железа и марганца. *Материалы и методы исследования.* Экспериментальные исследования проводили с применением комплекса физико-химических методов анализа. Для определения содержания ионов тяжелых металлов применяли адаптированные методики фотометрического анализа: для меди (II) – с пикрамином эпсилоном, для железа общего – с о-фенантролином, для ионов марганца (II) – окисление персульфатом аммония в азотнокислой среде до перманганат-ионов; для ионов цинка (II) – с дитизоном

Ключевые слова: кислые рудничные гидротехногенные образования, горнообогатительные предприятия, руды медноколчеданного комплекса, переработка, катионоselectивность, медь, железо, марганец, цинк, методы, технологические параметры, комплексное освоение техногенных объектов

The topical aspects of the stage-by-stage cation-selective processing of technogenic acid effluents formed on the territory of mining enterprises engaged in the development of ores of the copper pyrite complex are discussed in the article. The characteristic of the studied object of research is presented - acid mine waters of mining enterprises of the copper-pyrite complex. The analysis of the existing methods of sedimentation of technogenic wastewater from metal cations (copper, manganese, iron and zinc) has been carried out. The results of acid-base precipitation of polycationic solutions are presented. An analysis of the advantages and disadvantages of the technologies used for the processing and purification of technogenic formations of mining enterprises is given. The possibility of selective processing of the studied acidic mine waters with the purpose of their deep purification and obtaining conditioned metal-containing products is analyzed. A set of methods for stage-by-stage effective and selective purification of acid mine waters is proposed. The results of experimental studies of cementation of copper ions are presented. The influence of the main parameters of the cementation process on the quality of purification of polycomponent solutions is considered. The results of factorial analysis of acid-base precipitation of iron cations are presented. The results of experimental studies are presented, substantiating the technological feasibility of the complete conversion of iron into a trivalent form, using the method of redox precipitation. The results of the analysis of the effectiveness of the redox process for the selective precipitation of Mn^{2+} ions by active chlorine solutions are presented. Conclusions are drawn about the ecological and technological efficiency of the application of the considered set of methods for cation-selective purification of acidic technogenic mine waters. The relevance of the research lies in the urgent need to develop innovative technologies for the complex selective processing of technogenic hydromineral formations of mining enterprises, which, along with preventing the discharge of toxic effluents into natural water bodies, provides a significant increase in the efficiency of using natural mineral resources. *The purpose of the study* is to consider effective methods for the selective purification of technogenic waters, characterized by a high content

of zinc, copper, iron and manganese ions, with the aim of their complex processing and the possibility of obtaining high-quality metal-containing products. *The object of study* is the acidic mine waters of the mining enterprises of the copper-pyrite complex of the Southern Urals. *The subject* is the technological possibility of cation-selective processing of acid mine waters of mining enterprises of the copper-pyrite complex with a high content of copper, iron and manganese ions. *Material and research methods*. Experimental studies have been carried out using a complex of physicochemical methods of analysis. To determine the content of heavy metal ions, adapted methods of photometric analysis were used: for copper (II) - with picramin epsilon, for total iron - with o-phenanthroline, for manganese (II) ions - oxidation with ammonium persulfate in a nitric acid medium to permanganate -ions; for zinc (II) ions - with dithizone

Key words: acid mine hydrotechnogenic formations, mining and processing enterprises, ores of the copper pyrite complex, processing, cation selectivity, copper, iron, manganese, zinc, methods, teleological parameters, integrated development of technogenic objects

Введение. Работа горно-обогатительных предприятий способствует появлению большого количества техногенных образований, значительной составляющей которых являются подотвальные и рудничные воды, отличающиеся высокой концентрацией ионов тяжелых и цветных металлов. Следовательно, актуальным встает вопрос о целесообразности использования их в качестве дополнительного источника получения металлосодержащего сырья [1–3].

Приоритетными металлосодержащими загрязнителями горно-рудных предприятий медноколчеданного комплекса Урала являются катионные формы меди, цинка, железа и марганца (табл. 1).

Представленный анализ объемов техногенных стоков, формирующихся на территории горно-рудных предприятий, а также содержание в них катионов токсичных метал-

лов указывает на негативное воздействие на прилегающие водоемы¹ [4]. При этом следует учитывать, что загрязнение поверхностных водоемов происходит и в результате фильтрации подотвальных вод.

Разработанность темы. Анализ схем формирования техногенных стоков на ГОКах Урала, а также способов их очистки и переработки позволяет резюмировать, что практически на всех профильных предприятиях рудничные техногенные воды концентрируются на территории искусственных прудов – шламонакопителей, где затем подвергаются процессу нейтрализации известью, приводящему к образованию дисперсных систем, преимущественно в виде гидроокисей различных металлов (Cu²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺ и Fe_{общ}). Осветленные воды затем сбрасываются в естественные водоемы [4; 5].

Таблица 1 / Table 1

Элементный химический состав кислых вод горно-рудных предприятий медноколчеданного комплекса Урала [3] / Elemental chemical composition of acidic waters of mining enterprises of the copper-pyrite complex of the Urals [3]

Кислые рудничные воды ГОКов Южного Урала / Acid mine waters of mining and processing plants of the Southern Urals	Химический состав, мг/дм ³ Chemical composition, mg/dm ³						
	pH	Eh	Cu ²⁺	Fe _{общ}	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Cl ⁻
Сибайский филиал Учалинского ГОКа / Sibay branch Uchalinsky GOK	2,66	+375	238,5	216,4	235,2	563,6	105,2
Бурибаевский / Buribaevsky	2,87	+406	284,3	507,6	197,3	57,3	689,3
Учалинский / Uchalinsky	2,94	+425	170,1	474,3	184,5	721,4	215,9

¹ Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Варнавский Д. А. К вопросу переработки техногенных месторождений на территории горнообогатительных комбинатов // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке: материалы междунар. конф. Плаксинские чтения. – Иркутск: Репроцентр А1, 2019. – С. 386–389.

Существующая нейтрализационная технология характеризуется рядом существенных недостатков, а именно, в результате нейтрализации формируются значительные объемы шламов, которые складываются на территории предприятий и являются источником вторичного техногенного загрязнения² [7]. Поэтому современные эффективные технологии переработки и очистки рудничных стоков должны быть направлены на селективность разделения поликатионные растворы с возможностью получения кондиционных осадков с высоким содержанием ценных компонентов.

Результаты исследования и их обсуждение. Поликомпонентность исследуемых техногенных объектов, а также химические характеристики присутствующих высококонцентрированных катионов металлов указывают на технологическую целесообразность применения для катионселективной их переработки следующих методов:

– осаждение катионов металлов в виде нерастворимых гидроксидов с применением как нейтрализационных, так и окислительно-восстановительных методов³ [5; 7];

– электрохимическое осаждение, включающее как гальванические процессы (цементация), так и электролизные процессы⁴ [3; 7; 8].

На основании проведенных предварительных экспериментальных исследований установлены диапазоны значений pH осаждения гидроксидов меди, цинка, железа и марганца в результате процесса кислотного-основного осаждения (нейтрализации) (табл. 2).

На начальном этапе исследований экспериментальным путем проанализированы технологические аспекты возможности катионселективного разделения исследуемых водных систем с применением метода кислотного-основного осаждения. Полученные результаты исследований представлены в табл. 2, 3.

Результаты экспериментальных исследований, представленных в таблицах 2, 3, показали, что в диапазоне значений pH 2,50...7,54 наблюдается совместное соосаждение гидроксидов меди и железа. Исключение составляют катионы марганца и цинка, полное осаждение их в виде нерастворимых гидроксидов происходит в диапазоне значений pH 2,50...9,15. Следовательно, для комплексной селективной очистки кислых рудничных вод необходимо последовательное сочетание различных методов, включающих не только метод кислотного-основного соосаждения (нейтрализации).

Таблица 2 / Table 2

Результаты исследований катионселективного разделения поликомпонентных модельных систем: $Mn^{2+}-Fe^{2+}-Fe^{2+}-Cu^{2+}-Zn^{2+}$ методом кислотного-основного осаждения / The studies results of cation selective separation of polycomponent model systems: $Mn^{2+}-Fe^{2+}-Fe^{2+}-Cu^{2+}-Zn^{2+}$ by acid-base precipitation

Нерастворимые формы гидроксидов металлов / Insoluble forms of metal hydroxides	$Fe(OH)_3$	$Fe(OH)_2$	$Mn(OH)_2$	$Cu(OH)_2$	$Zn(OH)_2$
Значения pH начала осаждения / pH values at the start of precipitation	2,15	7,15	2,46	5,18	7,82
Значения pH, при котором гидроксид более не растворим / pH value at which the hydroxide is no longer soluble	4,10	7,86	9,10	7,10	9,15

² Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Смирнова А. В., Зайцева Е. В. Технология комплексной переработки гидротехногенных образований горных предприятий медноколчеданного профиля // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 10–17.

³ Там же; Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Пинчукова К. В., Глазкова Я. В., Кужугалдинова З. Б. О механизме электрокоагуляционного извлечения ионов марганца из технических растворов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 10-2. – С. 226–230.

⁴ Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Пинчукова К. В., Глазкова Я. В., Кужугалдинова З. Б. О механизме электрокоагуляционного извлечения ионов марганца из технических растворов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 10-2. – С. 226–230; Чантурия В. А., Медяник Н. Л., Шадрунова И. В., Мишурина О. А. Химические аспекты извлечения марганца из рудничных вод медноколчеданных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 160–169.

Таблица 3 / Table 3

Исследования процессов осаждения на четырехкомпонентных модельных системах /
 Studies of sedimentation processes on four-component model systems $Mn^{2+} - Fe^{3+} - Cu^{2+} - Zn^{2+}$

Исходная концентрация компонентов системы / Initial concentration system components	pH системы (начальная) / System pH (initial)	pH системы (конечная), после введения / System pH (final), after the introduction of	Остаточная концентрация компонентов системы, мг / дм ³ / Residual concentration of components systems, mg/dm ³
$C_{Mn^{2+}} = 100$ мг/дм ³	2,50	7,54	89,2
$C_{Fe_{\text{бщ}}} = 100$ мг/дм ³	2,50	7,54	следы / traces
$C_{Cu^{2+}} = 100$ мг/дм ³	2,50	7,54	следы / traces
$C_{Zn^{2+}} = 100$ мг/дм ³	2,50	7,54	92,8

Проведенный предварительный анализ литературных данных и патентный обзор показали, что селективное выделение ионов меди в виде кондиционного продукта возможно с применением гальванических процессов, а именно, на практике эффективно применяется метод цементации⁵ [9]. Целесообразность и химическая обоснованность применения данного процесса обусловлена значительной количественной разницей стандартных электродных потенциалов присутствующих катионов металлов:

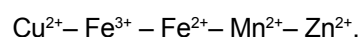
$$\begin{aligned} \varphi^0 Fe &= -0,44В; & \varphi^0 Zn &= -0,76В; \\ \varphi^0 Mn &= -1,18В; & \varphi^0 Cu &= +0,34В. \end{aligned}$$

Для извлечения железа целесообразно проводить предварительное его осаждение перед процессом селективного извлечения ионов марганца и цинка путем доведения pH системы до значения 4,10. В качестве реагента-осадителя для ионов железа можно применять различные щелочные растворы, в частности, на практике по большей части применяются суспендированные растворы кальция – известковое молоко [2; 10].

Для комплексного селективного разделения двухкомпонентных водных систем (Mn^{2+}/Zn^{2+}), учитывая поливалентность марганца, целесообразно применение процессов окислительно-восстановительного осаждения, с последующей очисткой от ионов цинка методом кислотного-основного осаждения.

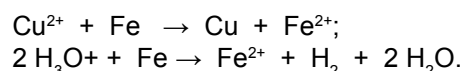
Представленные предложения комплексной селективной очистки техногенных вод горно-рудных предприятий медно-цинкового ком-

плекса апробированы экспериментальным путём. Во всех случаях использовали четырехкомпонентную модельную систему:



При исследовании процесса цементации катионной меди в качестве цементационной поверхности использовали железо. Данный выбор обусловлен тем, что в процессе цементации катионной меди формируются слои оксидов железа, характеризующиеся рыхлой и пористой поверхностью, что значительно интенсифицирует скорость и эффективность протекания процесса цементационного осаждения катионов меди [6; 7].

Химизм протекания процесса цементационного восстановления катионов меди железными стружками представлен следующими реакциями:



Факторный анализ процесса цементации указывает на то, что кинетика и эффективность процесса зависят от следующих технологических факторов: значений pH среды растворов, количественного расхода цементатора-осадителя (железной стружки), концентрации катионной меди в перерабатываемых растворах скорости протекания процесса. В работе экспериментальным путем установлены наиболее рациональные технологические параметры проведения процесса цементации с использованием железа в качестве цементатора-осадителя.

⁵ Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Смирнова А. В., Зайцева Е. В. Технология комплексной переработки гидротехногенных образований горных предприятий медноколчеданного профиля // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 10–17.

Исследование процесса цементационного извлечения ионов меди проводили как на четырехкомпонентных модельных растворах, так и на реальных водных объектах профильных горных предприятий (кислые рудничные воды).

Методика процесса заключалась в следующем: через лабораторный желоб, загруженный железной стружкой, пропускали исследуемые растворы. Продолжительность протекания процесса составляла 1...20 мин. Температурный режим поддерживали при комнатной температуре (20...25 °С). Эффективность протекания процесса цементации устанавливали йодометрическим методом.

Полученные результаты исследований представлены в виде графических зависимостей на рис. 1 и 2.

Анализ полученных значений показал, что наиболее полное осаждение ионов меди наблюдается в интервале значений pH 1,2...3,1.

Представленные кинетические кривые цементационного процесса (рис. 2) однозначно указывают на влияние численных параметров соотношения концентрации катионов меди в растворе и количеством цементатора-осадителя (железной стружки). Представленные зависимости позволяют утверждать, что рациональное технологическое осуществление процесса цементации возможно при соотно-

шении ионов меди к количеству цементатора-осадителя (железой стружки) 1:2. Исследование влияния продолжительности протекания процесса цементации на его эффективность позволили сделать следующие выводы: максимальные показатели извлечения меди возможны после 15 мин с момента поступления раствора в реактор-цементатор.

Экспериментальные исследования процесса нейтрализации проводились на двух- и четырехкомпонентных системах состава Cu^{2+} – Fe^{3+} – Fe^{2+} – Mn^{2+} – Zn^{2+} (табл. 2; 3), а также на двухкомпонентных модельных системах состава Fe^{3+} – Fe^{2+} (рис. 3). Они обоснованно дают возможность утверждать о технологической целесообразности применения для селективного извлечения железа, метода кислотно-основного осаждения с учетом обязательного предварительного окисления катионов Fe^{2+} до трехвалентной формы железа. Данное условие необходимо, так как на основании полученных кривых диапазон значений pH не позволяет селективно разделить исследуемые поликатионные растворы Cu^{2+} – Fe^{3+} – Fe^{2+} – Mn^{2+} – Zn^{2+} . Однако в случае полного окисления катионов двухвалентного железа до трехвалентных форм возможно катионселективно выделить железо из обозначенных водных систем в виде самостоятельной дисперсной фазы.

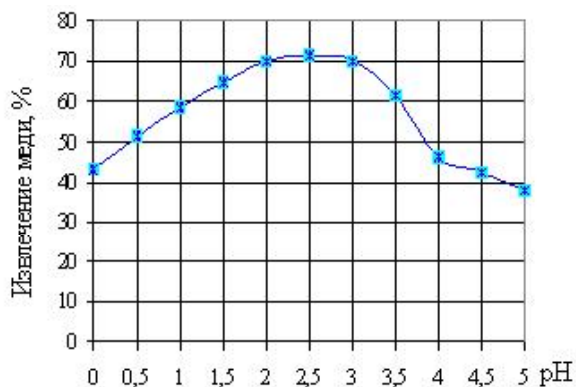


Рис. 1. Влияние кислотности растворов на извлечение меди из кислых рудничных вод методом цементации на железе /

Fig. 1. Influence of acidity of solutions on the extraction of copper from wastewater by cementation on iron

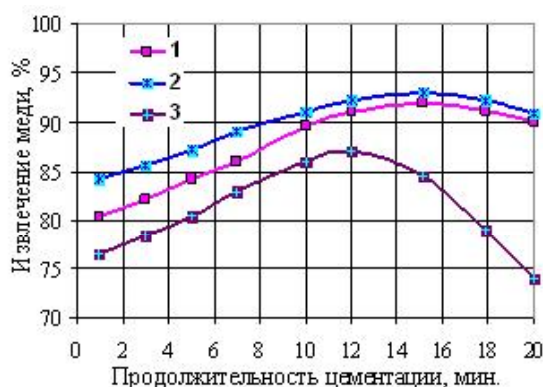


Рис. 2. Кинетика процесса цементации меди из кислых рудничных вод методом цементации на железе при различных сочетаниях меди и осадителя: 1 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 2,5;

2 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 2;
3 – соотношение Cu^{2+} и Fe 1 : 1,5 /
Fig. 2. Kinetics of copper cementation from acidic wastewater at various combinations of copper and iron: 1 – ratio Cu^{2+} and Fe 1 : 2,5;
2 – ratio Cu^{2+} and Fe 1 : 2;
3 – ratio Cu^{2+} and Fe 1 : 1,5

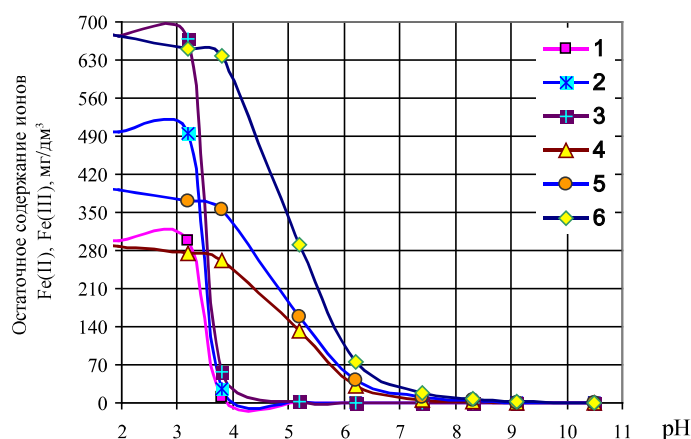


Рис. 3. Влияние pH на изменение концентрации ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} в однокомпонентных модельных растворах при протекании процесса кислотно-основного осаждения:

- 1 – концентрация Fe^{3+} в модельном растворе – 250 мг/дм³
- 2 – концентрация Fe^{3+} в модельном растворе – 400 мг/дм³
- 3 – концентрация Fe^{3+} в модельном растворе – 650 мг/дм³
- 4 – концентрация Fe^{2+} в модельном растворе – 250 мг/дм³
- 5 – концентрация Fe^{2+} в модельном растворе – 400 мг/дм³
- 6 – концентрация Fe^{2+} в модельном растворе – 650 мг/дм³ /

Fig. 3. Effect of pH on the change in the concentration of Fe^{2+} and Fe^{3+} ions in one-component model solutions during the course of the acid-base deposition process:

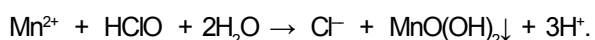
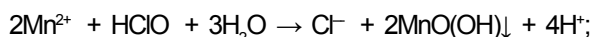
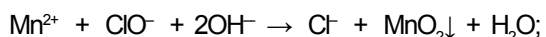
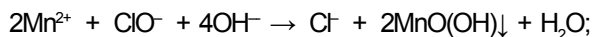
- 1 – concentration of Fe^{3+} in the model solution – 250 mg / dm³
- 2 – concentration of Fe^{3+} in the model solution – 400 mg / dm³
- 3 – concentration of Fe^{3+} in the model solution – 650 mg / dm³
- 4 – concentration of Fe^{2+} in the model solution – 250 mg / dm³
- 5 – concentration of Fe^{2+} in the model solution – 400 mg / dm³
- 6 – concentration of Fe^{2+} in the model solution – 650 mg / dm³

Факторный анализ процесса кислотно-основного осаждения катионов железа проводился с различной исходной концентрацией растворов (250...650 мг/дм³). В качестве реагентов использовали: для окисления катионов Fe^{2+} до трехвалентной формы – 10 %-ный раствор гипохлорита натрия; для последующего кислотно-основного осаждения – 1 %-ный суспензированный раствор известкового молока. Процесс осаждения железа проводили при непрерывном перемешивании в течение 20 мин. Эффективность и полноту извлечения катионов железа в виде дисперсной фазы определяли путем фиксации остаточной концентрации катионов Fe^{2+} и Fe^{3+} фотометрическим методом. Кинетические зависимости, представленные на рис. 3, показывают, что практически полное извлечение катионов железа будет возможно по достижении значений pH растворов 4,0.

Практическая реализация эффективно применяемых методов селективного выделения марганца из технологических растворов показала, что селективность разделения мар-

ганецсодержащих водных систем должна прежде всего учитывать форму его нахождения: катионная – Mn^{2+} , Mn^{3+} и Mn^{4+} и анионная – MnO_4^{2-} и MnO_4^- . Марганец в исследуемых объектах – рудничных водах медноколчеданного комплекса – содержится преимущественно в виде двухвалентных катионов. Учитывая достаточно широкий диапазон значений pH кислотно-основного осаждения, в работе сделан вывод о невозможности селективного выделения его данным способом. Исходя из поливалентных дисперсных форм марганца, в данных условиях наиболее целесообразно применение процессов окислительно-восстановительного осаждения его в виде $MnO(OH)$ и $MnO(OH)_2$. Наибольшее практическое применение в качестве реагентов-окислителей имеют различные формы хлорсодержащих окислителей – «активный хлор».

Химизм процесса окислительно-восстановительного осаждения двухкатионных форм марганца растворами «активного хлора» может быть представлен в следующем виде:



Для практического осуществления окислительно-восстановительных процессов часто используются электрохимические методы. Основными достоинствами электрохимических методов, в сравнении с реагентными, является возможность высокочувствительной селективной корректировки физико-химических параметров перерабатываемых технологических растворов; а также не менее актуальный вопрос – экологичность, исключая возможность вторичного загрязнения вод, что, как правило, в большинстве случаев наиболее характерно для реагентных методов.

Исходя из этого, процесс селективного выделения марганца из исследуемых поликатионных технологических растворов должен включать два основных этапа: первый – окисление двухкатионного марганца (Mn^{2+}) растворами «активного хлора» до дисперсных форм Mn^{3+} и Mn^{4+} , второй – процесс электрокоагуляционного осаждения и уплотнения образованных коллоидных осадков $\text{MnO}(\text{OH})$ и $\text{MnO}(\text{OH})_2$. Факторный анализ возможности и эффективности практического осуществления, данных методов применительно к исследуемым водным объектам проводили на бездиафрагменном электролизере с инертными электродами. Полученные результаты показали, что максимальные данные извлечения

катионов марганца в виде дисперсной фазы наблюдаются в диапазоне pH 5,0...7,5, что согласуется с возможностью селективного разделения водных систем, содержащих катионы Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} и Mn^{2+} .

Далее возможно проведение процесса кислотного-основного осаждения ионов цинка – согласно результатам предварительных экспериментальных исследований, представленных ранее (табл. 2; 3), диапазон значений pH кислотного-основного осаждения цинка в виде гидроксидов варьируется в диапазоне 7,8...9,2.

Выводы:

– сформированные в результате добычи и переработки медноколчеданных руд кислые рудничные стоки наносят существенный экологический вред прилегающим территориям;

– комплексная очистка техногенных вод горно-рудных месторождений возможна путем сочетания различных химических методов;

– рассмотренные в работе методы селективной переработки и очистки кислых рудничных вод от ионов меди, железа, марганца и цинка позволяют селективно разделить поликатионные водные системы;

– практическое внедрение предлагаемых в работе технологических решений селективной стадийной переработки и очистки кислых рудничных вод даст возможность повысить рентабельность предприятий за счет дополнительного получения кондиционного металлсодержащего сырья, а также позволит существенно повысить его экологическую безопасность.

Список литературы

1. Аренс В. Ж., Шумилова Л. В., Фазлуллин М. И., Хчеян Г. Х. Перспективные направления химической и микробиологической переработки минерального сырья цветных и благородных металлов // *Металлург*. 2017. № 9. С. 82–89.
2. Беляев Е. С., Блохин А. А., Мурашкин Ю. В., Михайленко М. А. Изучение сорбционного извлечения железа рядом хелатообразующих ионитов из сульфатных растворов повышенной кислотности, содержащих железо (III) // *Труды Кольского научного центра. Химия и материаловедение*. 2018. Т. 1, № 2. С. 233–236.
3. Голик В. И., Комащенко В. И. Практика выщелачивания металлов из отходов переработки руд // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 3. С. 13–23.
4. Меретуков, М. Г. Подземное выщелачивание медных руд // *Цветные металлы*. 2018. № 3. С. 21–26.
5. Мишурина О. А. Влияние природных и техногенных факторов на формирование гидротехногенных образований на территории гоков // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 12-1. С. 82–85.
6. Мишурина О. А. Электрофлотационное извлечение марганца из гидротехногенных ресурсов горных предприятий // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2009. № 3. С. 72–74.
7. Чантурия В. А. Инновационные технологии комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава // *Инновационные процессы комплексной переработки природного*

и техногенного минерального сырья: материалы междунар. конф. Плаксинские чтения. Апатиты: Кольский науч. центр РАН, 2020. С. 3–4.

8. Чупрова Л. В. Актуальность вопроса переработки гидротехногенных месторождений горных предприятий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11-5. С. 943–945.

9. Чупрова Л. В. Физико-химические методы определения микроколичеств ионов меди в сточных водах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11-5. С. 864–867.

10. Chuprova L. V., Ershova O. V., Mullina E. R., Mishurina O. A. Activization of research activities of students in the context of the implementation of the federal state educational standards of higher education // Фундаментальные исследования. 2018. Т. 2, № 19. С. 4319.

References

1. Arens V. Zh., Shumilova L. V., Fazlullin M. I., Khcheyan G. Kh.. *Metallurg* (Metallurg), 2017, no. 9, p. 82–89.
2. Belyayev Ye. S. Blokhin A. A., Murashkin Yu. V., Mikhaylenko M. A. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra. Himiya i materialovedeniye* (Proceedings of the Kola Scientific Center. Chemistry and Materials Science), 2018, vol. 1, no. 2, pp. 233–236.
3. Golik V. I., Komashchenko V. I. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* (Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences), 2016, no. 3, pp. 13–23.
4. Meretukov, M. G. *Tsvetnye metally* (Non-ferrous metals), 2018, no. 3, pp. 21–26.
5. Mishurina O. A. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* (International Journal of Applied and Fundamental Research), 2016, no. 12-1, pp. 82–85.
6. Mishurina O. A. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G. I. Nosova* (Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov), 2009, no. 3, pp. 72–74.
7. Chanturiya V. A. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoy pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineralnogo syriya: materialy mezhdunar. konf. Plaksinskiye chteniya* (Innovative processes of complex processing of natural and technogenic mineral raw materials: materials of the international. conf. Plaksin readings). Apatity: Kola scientific. Center of the Russian Academy of Sciences, 2020, pp. 3–4.
8. Chuprova L. V. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* (International Journal of Applied and Fundamental Research), 2016, no. 11-5, pp. 943–945.
9. Chuprova L. V. *Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* (International Journal of Applied and Fundamental Research), 2016, no. 11-5, pp. 864–867.
10. Chuprova L. V., Ershova O. V., Mullina E. R., Mishurina O. A. *Fundamental'nyye issledovaniya* (Basic research), 2018, vol 2, no.19, pp. 4319.

Информация об авторе

Медяник Надежда Леонидовна, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, комплексная технология переработки горно-обогатительного сырья
medyanikmagnitka@mail.ru

Мишурина Ольга Алексеевна, канд. техн. наук, доцент ВАК, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, технология физико-химической переработки техногенных образований
olegro74@mail.ru

Муллина Эльвира Ринатовна, канд. техн. наук, доцент ВАК, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, технология физико-химической переработки техногенных образований
e.mullina@inbox.ru

Бессонова Юлия Александровна, канд. экон. наук, доцент ВАК, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, технология физико-химической переработки техногенных образований
u.bessonova @inbox.ru

Дмитриева Ксения Алексеевна, аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: комплексная технология переработки горно-обогатительного сырья
Saule-p75@mail.ru

Арзамасцева Валерия Юрьевна, аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. Область научных интересов: комплексная технология переработки горно-обогатительного сырья
valeriya_kozhokar@mail.ru

Information about the author

Nadezhda Medyanik, doctor of technical sciences, professor, head of the Chemistry department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Research interests: mineral processing, complex technology of processing of mining and processing raw materials

Olga Mishurina, candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor, Chemistry department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Research interests: mineral processing, technology of physical and chemical processing of technogenic formations

Elvira Mullina, candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor, Chemistry department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Research interests: mineral processing, technology of physical and chemical processing of technogenic formations

Yulia Bessonova, candidate of economic sciences, associate professor, assistant professor, Chemistry department, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Research interests: mineral enrichment, technology of physical and chemical processing of technogenic formations

Ksenia Dmitrieva, postgraduate, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Research interests: complex technology of processing of mining and processing raw materials

Valeria Arzamastseva, postgraduate, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia. Research interests: complex technology of processing of mining and processing raw materials

Для цитирования

Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Бессонова Ю. А., Дмитриева К. А., Арзамасцева В. Ю. Комплексная переработка кислых рудничных вод горно-рудных предприятий // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 7. С. 34–43. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-34-43.

Medyanik N., Mishurina O., Mullina E., Bessonova Yu., Dmitrieva K., Arzamastseva V. To the question of complex processing of acid mining water of mining enterprises // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 7, pp. 34–43. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-34-43.

Статья поступила в редакцию: 20.06.2022 г.
Статья принята к публикации: 07.07.2022 г.