



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-196>

УДК 622.765.4

**Использование электрохимических воздействий в процессе флотационного дообогащения рядового железорудного концентрата****Х.К. Рахимов¹ , Е.Л. Чантурия^{1,2} , Д.В. Шехирев¹** ¹ Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация elenachan@mail.ru**Аннотация**

Одной из основных задач при переработке неокисленных железистых кварцитов является получение высококачественных железорудных концентратов, содержащих более 70 % железа общего и менее 1,8 % кремнезема для получения DR-окатышей и горячебрикетированного железа.

В настоящее время общепризнано, что наиболее эффективным способом получения высококачественных железорудных концентратов является обратная флотация катионными собирателями аминами в щелочной среде, однако из-за тончайшей вкрапленности магнетита в кварц, недостаточно полного раскрытия магнетита даже при тонком измельчении, а также из-за близости флотационных (поверхностных) свойств разделяемых минералов даже в процессе флотации не всегда возможно выделить высококачественные концентраты. В этой связи остается актуальным поиск способов повышения эффективности флотационного разделения минералов и повышения качества концентрата.

Ранее проведенными исследованиями показано, что с помощью электрохимической обработки можно регулировать свойства реагентов, усиливать их воздействие на определенные минералы и таким образом управлять процессом флотации. Поскольку эффективность флотации кварца и других силикатов аминами в существенной мере зависит от соотношения ионной и молекулярных форм реагента в водных растворах собирателя и во флотационной пульпе, изменение этого соотношения может влиять на результаты обратной катионной флотации железных руд. Изменение соотношения форм амина возможно при электрохимическом окислении или восстановлении раствора реагента. Кроме того, электрохимическая обработка способствует диспергации амина в водной среде и его физической адсорбции на минералах. Соответственно, предварительная электрохимическая обработка аминов может рассматриваться как одно из перспективных направлений интенсификации обратной флотации железных руд.

В статье представлены результаты поисковых исследований по улучшению качества надрешетного продукта тонкого грохочения рядового магнетитового концентрата Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева за счет использования в процессе обратной катионной флотации электрохимически обработанных растворов катионных собирателей класса аминов.

Результаты поисковых исследований подтвердили возможность применения предварительной бездифрагментной электрохимической обработки реагентов Tomamine PA-14 и Lilafлот 811M (эфиров моноамина различного состава) для направленного модифицирования их свойств и повышения эффективности обратной флотации надрешетного продукта: содержание кремнезема в камерном продукте снизилось с 1,66–1,7 % до 1,51–1,56 при содержании железа общего более 70 %.

Ключевые слова

неокисленные железистые кварциты, магнетитовый концентрат, обратная катионная флотация, амины, электрохимическая обработка

Для цитирования

Rakhimov Kh.K., Chanturiya E.L., Shekhirev D.V. Electrochemical action on the flotation beneficiation of ordinary iron ore concentrate. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):21–29. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-196>



BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Electrochemical action on the flotation beneficiation of ordinary iron ore concentrateKh. K. Rakhimov¹ , E. L. Chanturiya^{1, 2} , D. V. Shekhirev¹ ¹ University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation² N. V. Melnikov Institute for the Problems of Integrated Subsoil Development, Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation elenachan@mail.ru**Abstract**

One of the main challenges in processing fresh ferruginous quartzites is to obtain high-quality iron ore concentrates containing more than 70% total iron and less than 1.8% silica to produce DR pellets and hot Briquetted Iron (HBI). Currently, it is widely recognized that the most effective methods to achieve high-quality iron ore concentrates is through reverse flotation using cationic amine collectors in an alkaline medium. However, due to the very fine impregnation of magnetite in quartz, the insufficiently complete release of magnetite even with fine grinding, and the proximity of the flotation (surface) behavior of the separated minerals, high-quality concentrates are not always achievable in the flotation process. Consequently, exploring methods to enhance the efficiency of flotation separation of minerals and improve concentrate quality remains a pertinent issue. Historical studies have shown that electrochemical treatment can adjust the properties of reagents, enhance their effect on specific minerals, and thus control the flotation process. The efficiency of quartz and other silicates flotation by amines significantly depends on the ratio of ionic and molecular forms of the reagent in aqueous solutions of the collector and in the flotation pulp. Altering this ratio can impact the outcomes of reverse cationic flotation of iron ores. It is feasible to change the ratio of the amine forms through electrochemical oxidation or reduction of the reagent solution. Moreover, the electrochemical treatment facilitates the dispersion of the amine in the aqueous medium and its physical adsorption on minerals. Therefore, electrochemical pretreatment of amines can be considered a promising method for intensifying the reverse flotation of iron ore. This paper presents research results aimed at improving the quality of the oversize of the fine screening of ordinary magnetite concentrate from Mikhailovsky GOK, named after A. V. Varichev, through the use of electrochemically treated solutions of cationic amine class collectors in the process of reverse cationic flotation. The research findings confirmed the feasibility of using preliminary diaphragmless electrochemical treatment of reagents Tomamine RA-14 and Lilaflot 811M (esters of monoamine of different composition) for the targeted modification of their properties and for increasing the efficiency of reverse flotation. Consequently, the silica content in the flotation cell product decreased from 1.66–1.7% to 1.51–1.56, with the grade of total iron exceeding 70%.

Keywords

fresh ferruginous quartzites, magnetite concentrate, reverse cationic flotation, amines, electrochemical treatment

For citation

Rakhimov Kh.K., Chanturiya E.L., Shekhirev D.V. Electrochemical action on the flotation beneficiation of ordinary iron ore concentrate. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):21–29. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-196>

Введение

Одной из основных задач при переработке неокисленных железистых кварцитов является получение высококачественных железорудных концентратов, содержащих более 70 % железа общего и менее 1,8 % кремнезема для получения DRI-окатышей. Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов, в том числе возможность повышения качества рядового магнетитового концентрата с использованием его тонкого грохочения рассмотрены в работах [1, 2]. Ввиду особенностей текстуры и структуры руд: наличия тончайшей нераскрываемой вкрапленности кварца

в магнетит и магнетита в кварц, сложного взаимного прорастания магнетита, кварца и других силикатов, даже при тонком измельчении получить концентраты требуемого качества из руд магнитной сепарацией не представляется возможным. Требуется тонкое грохочение выделенных магнитной сепарацией рядовых магнетитовых концентратов, доизмельчение надрешетного продукта и его дальнейшая доводка флотацией. Так, в работах [3, 4] на основе результатов изучения вещественного состава надрешетного продукта тонкого грохочения рядового магнетитового концентрата магнитной сепарацией показано, что значительная часть всех минеральных фаз, составляющих ис-



ходный надрешетный продукт, находится в сростках между собой. Измельчение даже 80 % материала до крупности – 30 мкм приводит к более полному раскрытию бедных сростков магнетита при увеличении доли магнетита в виде богатых сростков и практически неизменной доле магнетита в виде раскрытых частиц. Кроме того, включения кварца и селадонита в магнетит, неразличимые как отдельные минеральные фазы и определяемые только по среднему элементному составу, не могут быть раскрыты даже при тонком измельчении, что приводит к снижению качества магнетитового концентрата. В работах представлены прогнозные (теоретически возможные) технологические показатели [3] и экспериментальные результаты обратной катионной флотации надрешетного продукта [5, 6].

В настоящее время общепризнано, что наиболее эффективным способом флотации железных руд и концентратов является обратная флотация катионными собирателями аминами в щелочной среде [7–9]. В работе [7] дан подробный обзор собирателей, депрессоров и регуляторов среды, используемых в мире при флотации железных руд. В публикациях [8, 9] даны характеристики катионных собирателей – аминов, рассмотрены различные типы аминов и представлены результаты их использования при флотации железных руд в зависимости от pH пульпы и гранулометрического состава частиц кварца. Сравнением результатов анионной и катионной обратной флотации железных руд установлено преимущество последней [10], а изучение влияния расхода крахмала как депрессора минералов железа при обратной флотации аминами в щелочной среде показало возможность повышения извлечения железа в камерный продукт [11]. Выводы об эффективности обратной катионной флотации железных руд аминами в щелочной среде сделаны и в работах [12, 13]. Но даже обратной флотацией аминами не всегда возможно получить концентраты высокого качества из-за недостаточно полного раскрытия магнетита даже при тонком измельчении и, соответственно, наличия сростков магнетита с кварцем и другими силикатами, а также из-за близости флотационных (поверхностных) свойств разделяемых минералов. Попытка решения проблемы повышения селективности флотации силикатов и Са-содержащих минералов от магнетита сделана в работах [14, 15] с использованием смеси собирателей, однако до сих пор остается актуальным поиск способов повышения эффективности разделения минералов и повышения качества магнетитового концентрата.

Ранее проведенными исследованиями показано, что с помощью электрохимической обработки можно регулировать свойства реагентов, усиливать их воздействие на определенные минералы и таким образом управлять процессом флотации [16, 17].

Известно, что форма присутствия реагента в его водном растворе в значительной степени влияет на строение и состав поверхностного гидрофобного слоя частиц минералов и, следовательно, на их флотационное поведение. В водной среде могут содержаться ионные, молекулярные, полимерные и мицеллярные

формы амина в соотношениях, зависящих от концентрации реагентов и условий среды [18]. Поскольку эффективность флотации кварца и других силикатов аминами в существенной мере преимущественно зависит от соотношения ионной и молекулярных форм реагента в растворах собирателя и во флотационной пульпе, изменение этого соотношения может влиять на результаты обратной катионной флотации железных руд [18]. Изменение соотношения различных форм амина возможно при электрохимическом окислении или восстановлении реагента в водном растворе. Кроме того, электрохимическая обработка способствует диспергации амина в водной среде и физической адсорбции реагента на минералах.

Исходя из вышесказанного, а также на основании данных литературных источников как перспективная рассматривается возможность интенсификации обратной флотации железных руд аминами после их предварительной электрохимической обработки.

В статье представлены результаты поисковых исследований по улучшению качества концентрата, полученного флотацией мелкого грохочения рядового магнетитового концентрата за счет использования в процессе обратной катионной флотации электрохимически обработанных растворов катионных собирателей класса аминов.

Объекты и методики исследования

Исследования проводили на материале надрешетного продукта тонкого грохочения рядового магнетитового концентрата Михайловского ГОКа имени А. В. Варичева (проба НД), минеральный и химический состав которого представлен в табл. 1 и 2.

В качестве собирателей в процессе флотационного дообогащения использованы катионные реагенты, производимые в промышленных масштабах компаниями Nouryon Surface Chemistry AB Akzo Nobel и Clariant, TOMAN PRODUCTS INC (табл. 3).

Электрохимическую обработку (ЭХО) 1 %-го раствора в оборотной воде МГОКа реагентов Lilafлот 811 М (смесь эфиров моноаминов (алкоксипропиламина) алкен C₁₃H₂₉NO (изомер) (50–70 %) + алкан C₁₅H₃₃NO₃ (30–50 %), степень нейтрализации 20–40 %) и Tomamine PA-14 (моноаминоэфир R-O-CH₂CH₂CH₂-NH₂; [3-(изодецилоксин) пропиламин-1] 95 %, степень нейтрализации 30 % + изоспирты C₉-C₁₁ 5 %; изо-C₁₀ – предельный) осуществляли постоянным электрическим током в лабораторной бездиафрагменной электрохимической ячейке из стекла объемом 150 мл (рис. 1). В качестве электродов (анода и катода) использовали нерастворимую титановую штампованную сетку с окисно-рутениевым покрытием. Соотношение рабочих площадей электродов составляло 1 : 2. Обработку раствора реагента проводили при объемной плотности тока 0,28, 0,4 и 0,6 Ач/л в «катодном» (электрод с большей площадью служил катодом) и «анодном» (электрод с большей площадью служил анодом) режиме. Электрический ток на электроды подавали через выпрямитель. В процессе обработки раствор перемешивали с помощью магнитной мешалки.



Таблица 1

Химический состав пробы НД, %

Проба НД	Fe _{общ.}	SiO ₂
НД, по данным МГОКа	61,7	12,6
НД, по данным РФА, прямой анализ	62,22	11,78
НД, по данным РФА, расчетное, средневзвешенное	61,32	11,80

Таблица 2

Минеральный состав надрешетного продукта по минеральным группам (по данным MLA)

Минеральная группа	Минералы, вошедшие в группу	Доля минеральной группы, %
Магнетит	«Чистый» магнетит, магнетит с тончайшими включениями кварца, магнетит с тончайшими включениями кварца и селадонита	84,77
Гематит	Гематит, гетит	3,82
Карбонаты	Анкерит, сидерит, кальцит	0,89
Кварц	Кварц, кварц с тончайшими включениями магнетита	7,73
Эгирин	Эгирин	0,71
Селадонит	Селадонит	1,73
Алюмосиликаты	Минералы группы алюмосиликатов	0,07
Прочие	Прочие	0,20
Железный скрап	Железный скрап	0,08
Итого	Сумма минералов	100,00

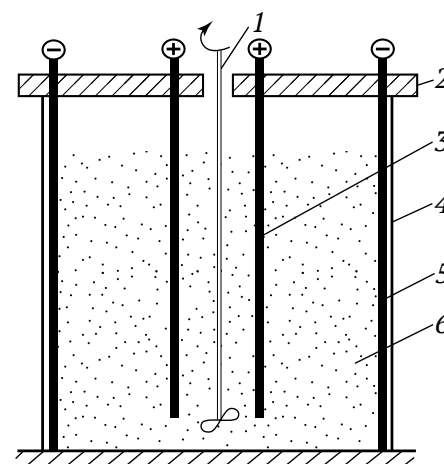


Рис. 1. Аппарат для бездиафрагменной обработки раствора реагента:
 1 – механическая мешалка;
 2 – съемная крышка из непроводящего материала с отверстием для механической мешалки;
 3 – анод цилиндрической формы (нерастворимая титановая штампованная сетка с окисно-рутениевым покрытием);
 4 – стакан из непроводящего материала (стекло);
 5 – катод цилиндрической формы (нерастворимая титановая штампованная сетка с окисно-рутениевым покрытием);
 6 – раствор реагента

Таблица 3

Условия электрохимической обработки оборотной воды и растворов реагентов

Режим	Объемная плотность тока, Ач/л	Время обработки, мин	pH исходное	Eh исходное	pH конечное	Eh конечное
Вода оборотная						
Анодный	0,28	10	7,784	+176,1	8,77	–243,2
Анодный	0,4	10	7,784	+176,1	8,11	–72,2
Анодный	0,6	10	7,784	+176,1	7,926	+142
Катодный	0,28	10	7,784	+176,1	8,34	+86,7
Катодный	0,4	10	7,784	+176,1	7,87	+134,8
Катодный	0,6	10	7,784	+176,1	8,06	–276
Tomamine						
Анодный	0,28	10	9,18	+60,5	9,06	+112
Анодный	0,4	10	9,18	+60,5	9,152	+125
Анодный	0,6	10	9,18	+60,5	9,23	+148,6
Катодный	0,28	10	9,18	+60,5	9,1	+32,3
Катодный	0,4	10	9,18	+60,5	9,33	+40,4
Катодный	0,6	10	9,18	+ 60,5	9,24	–302,3
Lilafлот 811M						
Катодный	0,28	10	7,91	+84	9,195	–360
Катодный	0,4	10	7,91	+84	9,0	–308,6
Катодный	0,6	10	7,91	+84	8,8	–330



Время электрохимической обработки раствора реагента (ЭХО) составляло 10 мин. До и после обработки регистрировали значения pH и Eh раствора реагента.

Обратную катионную флотацию измельченного надрешетного продукта тонкого грохочения рядового магнетитового концентрата реагентом Tomamine PA-14 проводили на навесках массой 294 г на оборотной воде Михайловского ГОКа по схеме, включающей предварительное магнитное уплотнение измельченного надрешетного продукта, основную обратную флотацию магнитной фракции, перерешетную обратную флотацию камерного продукта [3], а реагентом

Lilafлот 811М по аналогичной схеме, но без предварительного магнитного уплотнения. Во всех случаях время измельчения составляло 15 мин, расход собирателя в основную флотацию 240 г/т, в перерешетную – 100 г/т. Декстрин как депрессор магнетита подавали в основную флотацию (расход 600 г/т), значение pH создавали и поддерживали каустической содой на уровне 10–10,5.

Полученные результаты и их обсуждение

Условия электрохимической обработки и полученные результаты флотации представлены в табл. 3–5 и на рис. 2, 3.

Таблица 4

Результаты обратной катионной флотации с предварительным магнитным уплотнением и использованием электрохимически обработанного реагента Tomamine

Режим	Объемная плотность тока, Ач/л	Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
				Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂
Без обработки	–	н/м	6,3	16,32	67,13	1,65	35,42
		Пенный 1	29,2	53,71	21,93	25,29	53,87
		Пенный 2	7,4	67,47	4,07	8,02	2,52
		Камерный	57,2	70,39	1,70	65,04	8,19
		Исходный	100,0	61,9285	11,870	100,00	100,00
Анодный	0,28	н/м	4,5	15,85	67,82	1,17	24,81
		Пенный 1	33,6	51,9	23,88	28,36	64,83
		Пенный 2	8,2	66,29	4,49	8,81	2,96
		Камерный	53,7	70,51	1,7	61,67	7,39
		Исходный	100,0	61,445	12,365	100,00	100,00
Анодный	0,4	н/м	5,8	15,56	67,7	1,47	31,62
		Пенный 1	31,5	52,51	23,16	27,04	58,92
		Пенный 2	7,4	66,71	4,17	8,05	2,49
		Камерный	55,4	70,06	1,56	63,43	6,98
		Исходный	100,0	61,137	12,377	100,00	100,00
Анодный	0,6	н/м	5,6	15,8	67,71	1,45	30,39
		Пенный 1	32,1	52,44	23,23	27,55	59,58
		Пенный 2	7,7	66,81	4,45	8,45	2,75
		Камерный	54,6	69,99	1,67	62,55	7,29
		Исходный	100,0	61,071	12,510	100,00	100,00
Катодный	0,28	н/м	5,4	15,06	68,73	1,33	29,54
		Пенный 1	34,3	53,14	22,06	29,99	60,48
		Пенный 2	6,3	66,25	4,73	6,90	2,39
		Камерный	54,0	69,62	1,76	61,78	7,59
		Исходный	100,0	60,815	12,518	100,00	100,00
Катодный	0,4	н/м	6,1	19,47	63,02	1,96	31,36
		Пенный 1	31,3	52,18	22,99	26,74	58,34
		Пенный 2	6,7	66,19	4,4	7,32	2,41
		Камерный	55,9	69,9	1,74	63,99	7,89
		Исходный	100,0	61,018	12,321	100,00	100,00
Катодный	0,6	н/м	5,4	16,29	66,48	1,44	29,71
		Пенный 1	33,2	53,01	22,27	28,78	60,95
		Пенный 2	8,1	66,8	3,83	8,81	2,55
		Камерный	53,3	70,1	1,55	60,97	6,80
		Исходный	100,0	61,232	12,146	100,00	100,00



Из анализа полученных результатов следует, что для реагента Tomamine PA-14 заметный эффект показал анодный режим бездиафрагменной электрохимической обработки при объемной плотности тока 0,4 Ач/л, позволяющий, по сравнению с нулевым опытом без ЭХО при сохранении требуемого качества по содержанию железа общего (70,06 %), снизить содержание кремнезема с 1,7 до 1,56 % при некотором уменьшении извлечения с 65,04 % до 63,43 %. В катод-

ном режиме 0,6 Ач/л также получен концентрат высокого качества, содержащий железа общего 70,1 % при извлечении 60,97 против 65,04 % в опыте без ЭХО при содержании кремнезема 1,55 % (см. табл. 4, рис. 2).

Таким образом, электрохимическая обработка реагента Tomamine PA-14 оказала положительное влияние на показатели качества концентрата по кремнезему, существенно снижая его содержание при сохранении содержания железа на уровне более 70 %.

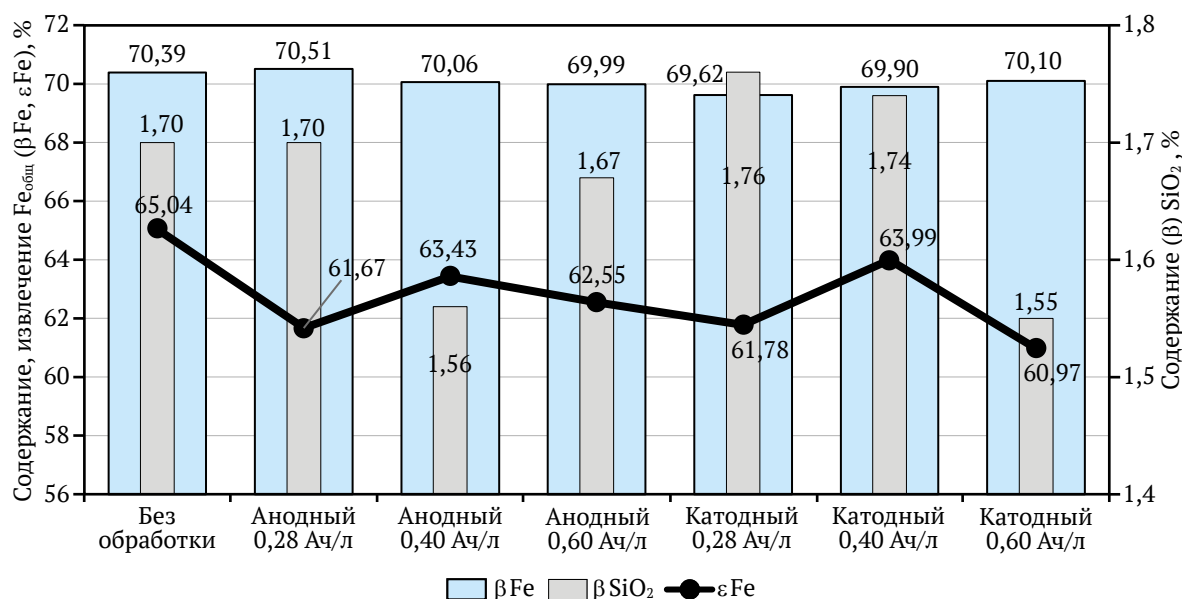


Рис. 2. Результаты обратной катионной флотации с предварительным магнитным уплотнением и использованием электрохимически обработанного реагента Tomamine PA-14

Таблица 5

Результаты обратной катионной флотации без предварительного магнитного уплотнения с использованием электрохимически обработанного реагента-аминa Lilafлот 811 М

Режим	Объемная плотность тока, Ач/л	Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
				Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂
Без обработки	–	Пенный 1	41,28	50,24	25,27	33,61	82,79
		Пенный 2	9,26	67,92	14,57	10,20	10,71
		Камерный	49,46	70,10	1,66	56,19	6,50
		Исходный	100,00	61,70	12,60	100,00	100,00
Катодный	0,28	Пенный 1	40,98	49,55	26,99	32,91	87,79
		Пенный 2	8,42	68,08	9,19	9,29	6,14
		Камерный	50,59	70,48	1,51	57,79	6,06
		Исходный	100,00	61,70	12,60	100	100,00
Катодный	0,4	Пенный 1	38,54	47,15	29,50	29,45	90,23
		Пенный 2	7,10	68,30	5,58	7,86	3,15
		Камерный	54,36	71,15	1,54	62,69	6,63
		Исходный	100,00	61,70	12,60	100,00	100,00
Катодный	0,6	Пенный 1	31,44	45,10	34,55	22,98	86,21
		Пенный 2	5,64	65,36	9,62	5,97	4,30
		Камерный	62,92	69,67	1,90	71,05	9,49
		Исходный	100,00	61,70	12,60	100,00	100,00

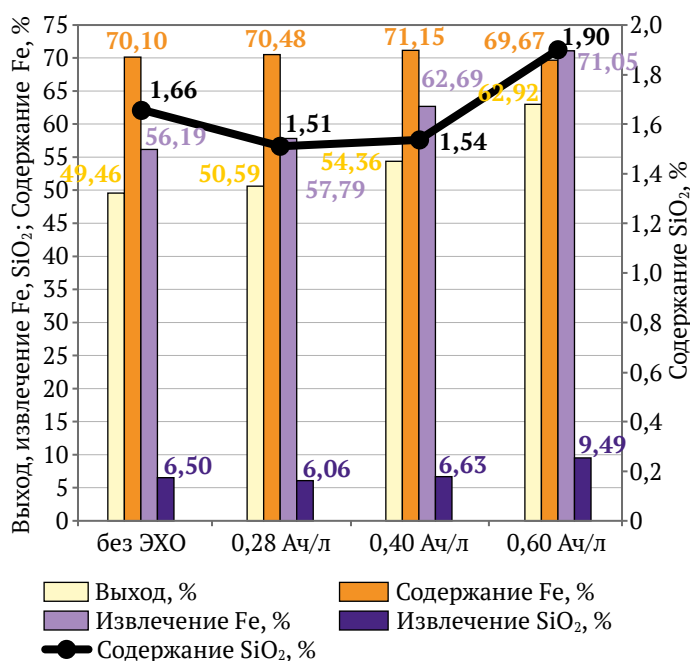


Рис. 3. Результаты обратной катионной флотации без предварительного магнитного уплотнения с использованием электрохимически обработанного реагента Lilafлот 811 М

Электрохимическая бездиафрагменная обработка реагента Lilafлот 811 М в катодном режиме также дала положительные результаты. Если без ЭХО реагента продукт флотации содержал 70,10 % Fe_{общ} и 1,66 % SiO₂ при извлечении 56,19 и 6,50 % соответственно, то обработка реагента при объемной плотности тока 0,28 Ач/л позволила повысить содержание в концентрате железа общего до 70,48 % и снизить содержание в нем кремнезема до 1,51 % при извлечении 57,79 и 6,06 % соответственно. Обработка реагента при объёмной плотности тока 0,4 Ач/л позволила повысить показатели и выделить высококачествен-

ный концентрат с содержанием железа общего 71,15 и 1,54 % кремнезема при извлечении 62,69 % Fe_{общ} и 6,63 % SiO₂ (см. табл. 5, рис. 3). Дальнейшая обработка реагента при повышении объемной плотности тока до 0,6 Ач/л нарушает процесс селекции, приводя к снижению качества железорудного концентрата при одновременном повышении извлечения железа общего в концентрат.

Реакции электроокисления и электровосстановления аминов весьма сложны и, несмотря на огромное число исследований, механизмы реакций не ясны. На аноде обычно происходит удаление одного электрона из электронной пары атома азота, а затем следует ряд сложных превращений, а на катоде реагент принимает дополнительный электрон. В случае аминов как флотационных реагентов необходимо также иметь в виду, что большинство из них является сложными смесями моноаминов, эфиров моно- и диаминов и т.п., что еще в большей степени затрудняет определение механизма их электроокисления или электровосстановления.

Выводы

Результаты проведенных поисковых исследований позволяют сделать вывод о возможности использования предварительной бездиафрагменной электрохимической обработки реагентов Tomamine PA-14 и Lilafлот 811М (эфиров моноамина различного состава) для направленного модифицирования их свойств и повышения эффективности обратной флотации надрешетного продукта с целью снижения в камерном продукте содержания кремнезема, повышения содержания и извлечения железа общего.

Необходимо отметить, что поскольку все катионные собиратели амины (моноамины, диамины и их эфиры) имеют различный состав и в большинстве случаев изначально представляют собой смеси, то для каждого реагента можно ожидать различные эффекты от электрохимической обработки. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо испытывать каждый собиратель в различных режимах ЭХО.

Список литературы / References

1. Варичев А.В., Кретов С.И., Кузин В.Ф. Крупномасштабное производство железорудной продукции в Российской Федерации. Под науч. ред. В.Ф. Кузина. М.: Изд-во МГТУ; 2010. 395 с.
Varichev A.V., Kretov S.I., Kuzin V.F. Large-scale iron ore production in the Russian Federation. Under the scientific ed. of B. F. Kuzin. Moscow: MGGU Publishing House; 2010. 395 p. (In Russ.)
2. Исмагилов Р.И., Козуб А.В., Гридасов И.Н., Шелепов Э.В. Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Горная промышленность. 2020;(4):98–103. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-4-98-103>
Ismagilov R.I., Kozub A.V., Gridasov I.N., Shelepov E.V. Case study: advanced solutions applied by JSC Andrei Varichev Mikhailovsky GOK to improve ferruginous quartzite concentration performance. Russian Mining Industry. 2020;(4):98–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-4-98-103>
3. Исмагилов Р.И., Чантурия Е.Л., Шехирев Д.В. Прогнозная оценка технологических показателей при обогащении железистых кварцитов. Устойчивое развитие горных территорий. 2022;14(4):529–545. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-4-529-545>
Ismagilov R.I., Chanturiya E.L., Shekhirev D.V. Prognostical assessment of technological indicators of ferruginous quartzites enrichment. Sustainable Development of Mountain Territories. 2022;14(4):529–545. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-4-529-545>



4. Исмагилов Р.И., Чантурия Е.Л., Шелепов Е.В. и др. Инновационная технология переработки магнетитовых концентратов для производства DRI-окатышей на АО «Михайловский ГОК имени А.В. Варичева». В: *Материалы международной конференции «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения» Плаксинские чтения – 2022*. Владивосток: Изд-во ДФУ; 2022. С. 5–14.
Ismagilov R.I., Chanturiya E.L., Shelepov E.V. et al. Innovative technology of magnetite concentrate processing for DRI pellets production at JSC “Mikhailovsky GOK named after A.V. Varichev”. In: *Proceedings of the international conference “Current problems of complex and deep processing of mineral raw materials of natural and anthropogenic origin” Readings from Plaksin-2022*. Vladivostok: DFU Publ; 2022. Pp. 5–14. (In Russ.)
5. Nikolaeva N.V., Aleksandrova T.N., Afanasova A., Chanturiya E.L. Mineral and technological features of magnetite-hematite ores and their influence on the choice of processing technology. *ACS Omega*. 2021;6(13):9077–9085. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00129>
6. Исмагилов Р.И., Чантурия Е.Л., Шехирев Д.В., Рахимов Х.К. Экспериментальная оценка эффективности катионных собирателей при обратной флотации надрешетного продукта тонкого грохочения рядового магнетитового концентрата Михайловского ГОКа имени А.В. Варичева. В: *Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2023)*. М.: Изд-во «Спутник +»; 2023. С. 251–254.
Ismagilov R.I., Chanturiya E.L., Shekhirev D.V., Rakhimov Kh.K. Experimental evaluation of the efficiency of cationic collectors in reverse flotation of the oversize of fine screening of ordinary magnetite concentrate from Named after A.V. Varichev Mikhailovsky GOK. In: *Current problems of complex and deep processing of natural and non-traditional mineral raw materials. Proceedings of the International Conference (Readings from Plaksin – 2023)*. Moscow: Sputnik+ Publishing House; 2023. Pp. 251–254. (In Russ.)
7. Araujo A.C., Vianna P.R.M., Peres A.E.C. Reagents in iron ores flotation. *Minerals Engineering*. 2005;18(2):219–224. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.08.023>
8. Papini R.M., Brandão P.R.G., Peres A.E.C. Cationic flotation of iron ores: amine characterisation and performance. *Minerals & Metallurgical Processing*. 2001;18:5–9. <https://doi.org/10.1007/BF03402863>
9. Vieira A.M., Peres A.E.C. The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz. *Minerals Engineering*. 2007;20(10):1008–1013. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.013>
10. Ma X., Marques M., Gontijo C. Comparative studies of reverse cationic/anionic flotation of Vale iron ore. *International Journal of Mineral Processing*. 2011;100(3–4):179–183. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.07.001>
11. Lima N.P., Valadão G.E.S., Peres A.E.C. Effect of amine and starch dosages on the reverse cationic flotation of an iron ore. *Minerals Engineering*. 2013;45:180–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.001>
12. Filippov L.O., Severov V.V., Filippova I.V. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 2014;127:62–69. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.01.002>
13. Nakhaei F., Irannajad M. Reagent types in flotation of iron oxide minerals: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018;39(2):89–124. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1391245>
14. Filippov L.O., Filippova I.V., Severov V.V. The use of collector’s mixture in the reverse cationic flotation of magnetite ore: the role of Fe-bearing silicates. *Minerals Engineering*. 2010;23(2):91–98. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.10.007>
15. Filippov L.O., Duverger A., Filippova I.V., Kasaini H., Thiry J. Selective flotation of silicates and Ca-bearing minerals: the role of non-ionic reagent on cationic flotation. *Minerals Engineering*. 2012;36–38:314–323. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.07.013>
16. Чантурия В.А., Назарова Г.Н. *Электрохимическая технология в обогачительно-гидрометаллургических процессах*. М.: Наука; 1977. 160 с.
Chanturiya V.A., Nazarova G.N. *Electrochemical technology in hydrometallurgical beneficiation processes*. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 160 p. (In Russ.)
17. Чантурия В.А., Дмитриева Г.М., Трофимова Э.А. *Интенсификация обогащения железных руд сложного вещественного состава*. М.: Наука; 1988. 206 с.
Chanturiya V.A., Dmitrieva G.M., Trofimova E.A. *Intensification of beneficiation of iron ores of complex material composition*. Moscow: Nauka Publ.; 1988. 206 p. (In Russ.)
18. Рябой В.И. Катионные реагенты. В: *Физико-химические основы теории флотации*. М.: Наука; 1983. С. 167–181.
Ryaboy V.I. Cationic reagents. In: *Physico-chemical fundamentals of flotation theory*. Moscow: Nauka Publ.; 1983. Pp. 167–181. (In Russ.)



Информация об авторах

Хусрав Каюмович Рахимов – аспирант кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-8644-7055](#); e-mail rakhimov.khusrav@mail.ru

Елена Леонидовна Чантурия – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5757-4799](#), Scopus ID [57196009376](#), ResearcherID [J-4214-2014](#), AuthorID [67982](#); e-mail elenachan@mail.ru

Дмитрий Витальевич Шехирев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9668-9716](#), Scopus ID [57170910700](#), AuthorID [589402](#); e-mail shekhirev@list.ru

Information about the authors

Khusrav K. Rakhimov – PhD-Student of the Department of Enrichment and Processing of Mineral Resources and Technogenic Raw Materials, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0007-8644-7055](#); e-mail rakhimov.khusrav@mail.ru

Elena L. Chanturiya – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Enrichment and Processing of Mineral Resources and Technogenic Raw Materials, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5757-4799](#), Scopus ID [57196009376](#), ResearcherID [J-4214-2014](#), AuthorID [67982](#); e-mail elenachan@mail.ru

Dmitry V. Shekhirev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Enrichment and Processing of Minerals and Technogenic Raw Materials, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9668-9716](#), Scopus ID [57170910700](#), AuthorID [589402](#); e-mail shekhirev@list.ru

Поступила в редакцию	27.12.2023
Поступила после рецензирования	19.01.2024
Принята к публикации	20.01.2024

Received	27.12.2023
Revised	19.01.2024
Accepted	20.01.2024