

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ МАТОЧНОГО РАСТВОРА ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФАТА
МАГНИЯ ОТ ПРИМЕСЕЙ Fe^{3+} , Al^{3+} И Cr^{3+} МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИИ**

К.А. Иншакова, В.А. Бродский, Е.Г. Рудаковская

Ксения Александровна Иншакова (ORCID 0009-0001-4533-4165) *, Владимир Александрович Бродский (ORCID 0000-0003-2266-795X)

Кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, Российская Федерация, 125047
E-mail: inshakova92@gmail.com *, vladimir_brodsky@mail.ru

Елена Георгиевна Рудаковская (ORCID 0009-0001-7605-3518)

Кафедра высшей математики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, Российская Федерация, 125047
E-mail: rudeg@list.ru

Исследовано влияние флокулянтов и поверхностно-активных веществ различной природы на процесс очистки маточного раствора $MgSO_4$ от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации. Исследование направлено на увеличение выхода сульфата магния путем возвращения очищенного маточного раствора в голову процесса на стадию кислотного разложения серпентинитомагнезита. В экспериментах использовались модельные растворы с концентрацией $MgSO_4$ – 100 г/л, содержание ионов Fe^{3+} – 50 мг/л, Al^{3+} – 10 мг/л и Cr^{3+} – 10 мг/л. Определено, что все примеси при корректировке pH переходят в малорастворимые соединения при значениях 6 – 7. Для проведения процесса очистки $MgSO_4$ методом электрофлотации установлена оптимальная объемная плотность тока, которая составляет 0,4 А/л. Продолжительность проведения электрофлотационной очистки 30 мин. При изучении влияния поверхностно-активных веществ катионного, анионного и амфотерного типов на процесс очистки $MgSO_4$ методом электрофлотации установлено, что степень извлечения примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} не превышает 10 – 30%, исключением является присутствие амфотерного поверхностно-активного вещества, при котором степень извлечения Fe^{3+} составляет 77 – 78%. Установлено, что наибольшая эффективность извлечения примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} из раствора $MgSO_4$ достигается в присутствии анионного флокулянта Praestol 2540. При использовании этого флокулянта степень извлечения по всем компонентам достигает 98-99% уже на десятой минуте проведения процесса. Таким образом, очистка $MgSO_4$ от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации в присутствии анионного флокулянта Praestol 2540 позволит возвращать очищенный маточный раствор в начало процесса на стадию серноокислотного разложения серпентинитомагнезита при производстве сульфата магния, что позволит повысить выход продукта.

Ключевые слова: электрофлотация, флокулянты, поверхностно-активные вещества, сульфат магния, удобрение, тяжелые металлы

Для цитирования:

Иншакова К.А., Бродский В.А., Рудаковская Е.Г. Влияние высокомолекулярных соединений различной природы на эффективность очистки маточного раствора производства сульфата магния от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 4. С. 72–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246704.6923.

For citation:

Inshakova K.A., Brodskiy V.A., Rudakovskaya E.G. Influence of high-molecular compounds of different nature on the efficiency of purification the mother liquor of magnesium sulfate production from impurities Fe^{3+} , Al^{3+} and Cr^{3+} by electroflotation. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 4. P. 72–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246704.6923.

INFLUENCE OF HIGH-MOLECULARS COMPOUNDS OF DIFFERENT NATURE ON THE EFFICIENCY OF PURIFICATION THE MOTHER LIQUOR OF MAGNESIUM SULFATE PRODUCTION FROM IMPURITIES Fe^{3+} , Al^{3+} AND Cr^{3+} BY ELECTROFLOTATION

K.A. Inshakova, V.A. Brodskiy, E.G. Rudakovskaya

Ksenia A. Inshakova (ORCID 0009-0001-4533-4165) *, Vladimir A. Brodskiy (ORCID 0000-0003-2266-795X)
Department of Technology of Inorganic Substances and Electrochemical Processes, Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya sqr., 9, Moscow, 125047, Russia
E-mail: inshakova92@gmail.com *, vladimir_brodsky@mail.ru

Elena G. Rudakovskaya (ORCID 0009-0001-7605-3518)
Department of Higher Mathematics, Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya sqr., 9, Moscow, 125047, Russia
E-mail: rudeg@list.ru

The effect of flocculants and surfactants of different nature on the process of purification of the $MgSO_4$ mother liquor from Fe^{3+} , Al^{3+} and Cr^{3+} impurities by electroflotation was investigated. The study is aimed at increasing the yield of magnesium sulfate by returning the purified mother liquor to the head of the process at the stage of acid decomposition of serpentinitomagnesite. In the experiments, model solutions with a concentration of $MgSO_4$ – 100 g/l, the content ions of Fe^{3+} – 50 mg/l, Al^{3+} – 10 mg/l and Cr^{3+} – 10 mg/l were used. It was determined that all impurities during pH adjustment turn into slightly soluble compounds at values 6 – 7. For the $MgSO_4$ purification process by electroflotation, the optimal current density was established, which is 0.4 A/l. The duration of the process of purification by electroflotation is 30 min. When studying the effect of surfactants of cationic, anionic, nonionic and amphoteric types on the $MgSO_4$ purification process by electroflotation, it was found that the degree of extraction of Fe^{3+} , Al^{3+} and Cr^{3+} impurities does not exceed 10-30%, the exception is the presence of an amphoteric surfactant, in which the degree of extraction of Fe^{3+} is 77 – 78%. It was found that the greatest efficiency of extraction of Fe^{3+} , Al^{3+} and Cr^{3+} impurities from $MgSO_4$ solution is achieved in the presence of anionic flocculant Praestol 2540. The degree of extraction for all components reaches 98-99% already at the tenth minute of the process. Thus, the purification of $MgSO_4$ from Fe^{3+} , Al^{3+} and Cr^{3+} impurities by electroflotation in the presence of anionic flocculant Praestol 2540 will allow the purified mother liquor to be returned to the beginning of the process at the stage of sulfuric acid decomposition of serpentinitomagnesite during the production of magnesium sulfate, which will increase the yield of the product.

Key words: electroflotation, flocculants, surfactants, magnesium sulphate, amendment, heavy metals

ВВЕДЕНИЕ

Известно большое число методов переработки магнийсодержащего сырья, которые в основном направлены на получение оксида магния [1-3]. Они базируются на вскрытии минерального сырья различными кислотами, такими как соляная, азотная и серная [3, 4].

Некоторые из них пригодны и для переработки серпентинитового сырья для получения сульфата магния на основе серноокислотного вскрытия

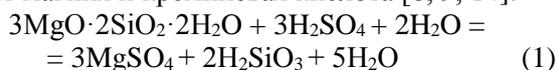
магнийсодержащего сырья. Сульфат магния получают из доломита [5-7], серпентинита [8-10] и магнезита [11], а также из магнийсодержащего боратового сырья.

Так, при получении сульфата магния в качестве магниевого удобрения путем переработки серпентинитовых руд (серпентинитомагнезита) Халиловского месторождения используется технология серноокислотного вскрытия магнийсодержащего сырья, с последующей фильтрацией образующейся суспензии и кристаллизацией целевого

продукта [8-10, 12]. При этом фильтрат суспензии (маточный раствор) можно использовать для получения целевых продуктов после очистки от загрязняющих примесей.

Магнийсодержащее сырье Халиловского месторождения состоит из нерудных минералов, таких как серпентин, магнезит, кварц и кальцит, а также из рудных минералов магнетита и хромита [10, 13].

На первой стадии при разложении серпентинитомагнезита Халиловского месторождения серной кислотой основной является реакция вскрытия серпентина, при протекании которой образуется сульфат магния и кремниевая кислота [8, 9, 14]:



После разложения магнийсодержащего сырья, образовавшуюся суспензию сульфата магния разделяют на две фракции: влажные кристаллы и маточный раствор. Теоретический выход сульфата магния в одноцикловом режиме (без возврата маточного раствора) может составить около 55%. Остальное количество сульфата магния (около 45% от общего) остается в маточном растворе, который загрязнен примесями Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} .

Таким образом, актуальной проблемой является очистка маточного раствора сульфата магния от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} с целью возвращения маточного раствора в голову процесса на стадию кислотного разложения серпентинитомагнезита. Это позволит увеличить выход целевого продукта сульфата магния, а также снизит количество образующегося отхода – маточного раствора с примесями загрязняющих компонентов путем повторного вовлечения сульфата магния в технологический процесс.

В качестве метода очистки рассмотрен метод электрофлотации, который широко применяется в процессах водоочистки и очистки технологических растворов от различных загрязнений [15-21]. Электрофлотационные процессы интенсифицируются в присутствии высокомолекулярных веществ (поверхностно-активные вещества, и флокулянты), а также коагулянтов. Применение флокулянтов и поверхностно-активных веществ наиболее эффективно, т.к. не вызывает вторичного загрязнения обрабатываемой среды [22-24].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследований являлся модельный раствор сульфата магния с концентрацией 100 г/л, содержащий примеси металлов Fe^{3+} – 50 мг/л, Al^{3+} – 10 мг/л и Cr^{3+} – 10 мг/л. Для приготовления

модельного раствора сульфата магния использовали магний сернокислый 7-водный (ХЧ) ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, ГОСТ 4523-77). Для моделирования загрязняющих примесей в раствор сульфата магния вводили в заданном количестве растворы железа сернокислого (III) 9-водного (ЧДА) ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, ГОСТ 9485-74), алюминия сернокислого 18-водного (Ч) ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, ГОСТ 3758-75), хрома сернокислого (III) 6-водного (Ч) ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ГОСТ 4472-78). Для корректировки pH с целью перевода ионов в дисперсную фазу [25] использовали раствор щелочи, гидроксид натрия (натрий гидроксид (ХЧ) (NaOH , ГОСТ 4328-77). Измерение pH осуществляли с помощью иономера И-160 МИ.

Процесс очистки модельного раствора производства MgSO_4 от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации [26, 27] осуществляли в непроточном аппарате, объемом 0,5 л, с нерастворимыми электродами, анод – титановая пластина с оксидным рутениевым титановым покрытием (ОРТА), катод – сетка из нержавеющей стали. При проведении процесса электрофлотации объемная плотность тока варьировалась от 0,4 А/л до 0,6 А/л. Фильтрацию растворов проводили с использованием фильтров марки «синяя лента» с диаметром пор 2-3 мкм.

Для исследования влияния высокомолекулярных соединений различной природы на эффективность очистки MgSO_4 от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации использовались следующие поверхностно-активные вещества (ПАВ) различной природы [23, 25, 28-31], с концентрацией 5 мг/л в исследуемых модельных растворах: додецилсульфат натрия (NaDDS , анионный ПАВ), полиэтилен оксид (ПЭО-1500, неионный ПАВ), алкилдиметил (2-гидроксиэтил) аммоний хлорид (Катинол, катионный ПАВ), Алкилбетаин С12 – С14, 30% (Бетапав А1214.30, амфотерный ПАВ), а также флокулянты различной природы [23, 25, 28-31] с концентрацией 5 мг/л в исследуемых модельных растворах: катионного (Praestol® 854), анионного (Praestol® 2540) и неионного (Praestol® 2500) типов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование по определению оптимального pH среды для совместного извлечения примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} из модельного раствора MgSO_4 (рис. 1). Концентрация MgSO_4 составляет 100 г/л, содержание ионов Fe^{3+} – 50 мг/л, Al^{3+} – 10 мг/л и Cr^{3+} – 10 мг/л.

Показано, что при достижении pH 6 все три металла переходят в форму малорастворимых соединений, степень извлечения достигает 99% по

всем компонентам. При pH более 8 соединения алюминия начинают переходить в форму растворимых алюминатов из-за амфотерных свойств алюминия.

Таким образом, оптимальное значение pH среды для проведения процесса очистки модельного раствора $MgSO_4$ от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации – 6-7.

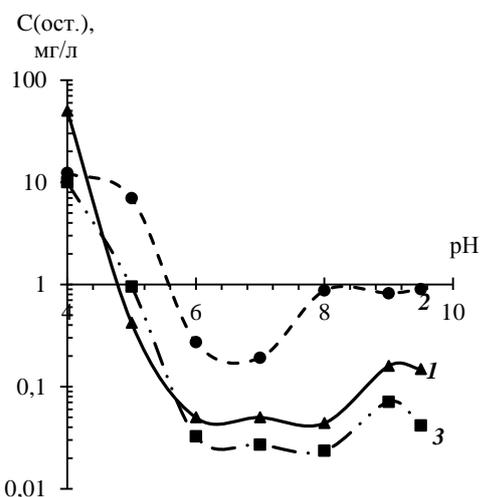


Рис. 1. Определение оптимального pH среды для проведения очистки $MgSO_4$ от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации: 1 – Fe^{3+} , 2 – Al^{3+} , 3 – Cr^{3+}

Fig. 1. Determination of the optimal pH of medium for the treatment of $MgSO_4$ from Fe^{3+} , Al^{3+} and Cr^{3+} impurities by electroflotation: 1 – Fe^{3+} , 2 – Al^{3+} , 3 – Cr^{3+}

Также проведены исследования по определению оптимальной плотности тока для извлечения малорастворимых соединений Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} из модельного раствора $MgSO_4$ методом электрофлотации.

В соответствии с полученными ранее данными [26, 27], при плотности тока 0,4 А/л степень извлечения по всем компонентам не превышает 10% через 30 мин после начала процесса электрофлотации. Повышение плотности тока до 0,6 А/л не приводит к увеличению эффективности электрофлотационного процесса. Последующая фильтрация растворов, подвергшихся электрофлотационной обработке, при плотности тока 0,4 А/л позволяет повысить эффективность извлечения до порядка 85-95% по всем примесям. Таким образом, оптимальная плотность тока для проведения рассматриваемого процесса 0,4 А/л.

1. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на процесс очистки раствора $MgSO_4$ от примесей металлов Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+}

Изучено влияние ПАВ различной природы на эффективность очистки $MgSO_4$ от примесей

Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методами электрофлотации и электрофлотации с последующей фильтрацией. Исследования проводились на модельных растворах с pH 6-7 и плотности тока 0,4 А/л. Продолжительность электрофлотационного процесса – 30 мин. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

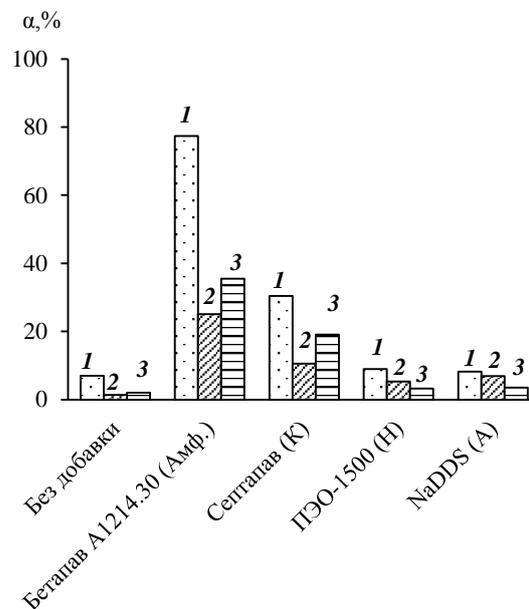


Рис. 2. Степень извлечения примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} из раствора $MgSO_4$ методом электрофлотации в присутствии ПАВ амфотерного (Амф.), катионного (К), неионного (Н) и анионного (А) типов: 1 – Fe^{3+} , 2 – Al^{3+} , 3 – Cr^{3+}

Fig. 2. Degree of extraction of Fe^{3+} , Al^{3+} and Cr^{3+} impurities from $MgSO_4$ solution by electroflotation in the presence of surfactants of amphoteric (Amp.), cationic (C), nonionic (N) and anionic (A) types: 1 – Fe^{3+} , 2 – Al^{3+} , 3 – Cr^{3+}

Установлено, что использование ПАВ катионного, неионного и анионного типов, не оказывают положительного влияния на электрофлотационный процесс извлечения примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} из раствора $MgSO_4$. Среди всех типов ПАВ лучшие показатели по степени извлечения достигаются в присутствии амфотерного Бетапав А1214.30. Выявлено, что степень электрофлотационного извлечения малорастворимых соединений Fe^{3+} достигает 78%, Al^{3+} – 25% и Cr^{3+} – 35% с применением амфотерного Бетапав А1214.30. Дальнейшее проведение фильтрации технологического раствора $MgSO_4$ позволяет незначительно повысить степень извлечения примесей до 80%, 29% и 36% соответственно.

2. Исследование влияния флокулянтов на процесс очистки раствора $MgSO_4$ от примесей металлов Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+}

Исследовано влияние природы флокулянтов на эффективность очистки $MgSO_4$ от примесей

Fe³⁺, Al³⁺ и Cr³⁺ методами электрофлотации и электрофлотации с последующей фильтрацией. Исследования проводились на модельных растворах с pH 6-7 и плотности тока 0,4 А/л. Продолжительность электрофлотационного процесса – 30 мин. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.

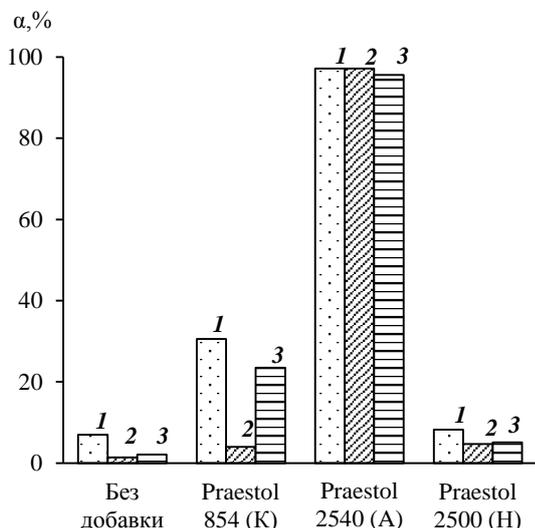


Рис. 3. Степень извлечения примесей Fe³⁺, Al³⁺ и Cr³⁺ из раствора MgSO₄ методом электрофлотации в присутствии флокулянтов катионного (К), неионного (Н) и анионного (А) типов: 1 – Fe³⁺, 2 – Al³⁺, 3 – Cr³⁺

Fig. 3. Degree of extraction of Fe³⁺, Al³⁺ and Cr³⁺ impurities from MgSO₄ solution by electroflotation in the presence of flocculants of cationic (C), nonionic (N) and anionic (A) types: 1 – Fe³⁺, 2 – Al³⁺, 3 – Cr³⁺

Проведено сравнение полученных данных для флокулянтов различной природы (рис. 3). По-

казано, что наиболее эффективно электрофлотационный процесс извлечения примесей металлов (Fe³⁺, Al³⁺ и Cr³⁺) из раствора MgSO₄ протекает в присутствии флокулянта анионного типа Praestol 2540, что согласуется с полученными ранее данными [19].

Получена кинетическая зависимость степени извлечения примесей Fe³⁺, Al³⁺ и Cr³⁺ из раствора MgSO₄ в присутствии анионного флокулянта Praestol 2540 (рис. 4).

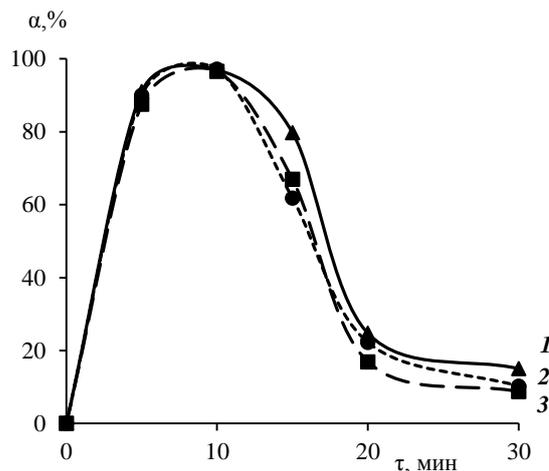


Рис. 4. Зависимость степени извлечения примесей Fe³⁺, Al³⁺ и Cr³⁺ из раствора MgSO₄ от времени проведения процесса электрофлотации в присутствии анионного флокулянта Praestol 2540: 1 – Fe³⁺, 2 – Al³⁺, 3 – Cr³⁺

Fig. 4. Dependence of the degree of extraction of Fe³⁺, Al³⁺ and Cr³⁺ impurities from MgSO₄ solution on the time of the electroflotation process in the presence of anionic flocculant Praestol 2540: 1 – Fe³⁺, 2 – Al³⁺, 3 – Cr³⁺

Таблица

Влияние флокулянтов и ПАВ различной природы на эффективность очистки маточного раствора производства MgSO₄ от примесей Fe³⁺, Al³⁺ и Cr³⁺ методом электрофлотации

Table. The effect of flocculants and surfactants of various nature on the efficiency of treatment of the mother solution of MgSO₄ production from Fe³⁺, Al³⁺ and Cr³⁺ impurities by electroflotation

Добавки	α, % (электрофлотация)			α, % (электрофлотация + фильтрация)			С(ост.), мг/л (электрофлотация + фильтрация)			
	Fe ³⁺	Al ³⁺	Cr ³⁺	Fe ³⁺	Al ³⁺	Cr ³⁺	Fe ³⁺	Al ³⁺	Cr ³⁺	
Без добавок	7	1	2	99	80	86	0,5	2	1,4	
Флокулянты	Катионный	30	4	24	96	63	50	2	3,7	5
	Анионный	98	98	96	99	99	98	0,5	0,1	0,2
	Неионный	8	5	6	89	75	42	5,5	2,5	5,8
ПАВ	Катионный	31	11	19	63	11	19	18,5	8,9	8,1
	Анионный	8	7	4	60	14	12	20	8,6	8,8
	Неионный	9	6	4	63	17	14	18,5	8,3	8,6
	Амфотерный	78	25	35	80	29	36	10	7,1	6,4

Условия эксперимента: C(MgSO₄) = 100 г/л; C(Fe³⁺) = 50 мг/л; C(Al³⁺) = 10 мг/л; C(Cr³⁺) = 10 мг/л; С (ПАВ, флокулянтов) = 5 мг/л. i_v = 0,4 А/л, pH = 6 – 7, τ = 30 мин.

Application: C(MgSO₄) = 100 g/l; C(Fe³⁺) = 50 mg/l; C(Al³⁺) = 10 mg/L; C(Cr³⁺) = 10 mg/L; S (surfactants, flocculants) = 5 mg/L. i_v = 0.4 A/l, pH = 6-7, τ = 30 min.

Степень извлечения примесей металлов Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} проходит через экстремум, максимальное значение наблюдается на 10 мин. Эффективная степень извлечения по всем трем компонентам Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} достигает порядка 97-98%. Последующее снижение степени извлечения обусловлено осаждением пенного слоя с поверхности раствора, что вызвано максимальной толщиной пенного слоя при эффективности извлечения 97-98%. Данный эффект не наблюдается при постоянном удалении пенного слоя в промышленных аппаратах. Проведение фильтрации раствора повышает степень извлечения до 99%.

Проведено обобщение экспериментальных данных (таблица). Показано, что наиболее эффективное влияние на очистку раствора MgSO_4 от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации и электрофлотации с последующей фильтрацией оказывает анионный флокулянт Praestol 2540. Остаточная концентрация ионов Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} в фильтрате не превышает 0,5, 0,1 и 0,2 мг/л соответственно. Необходимо отметить, что использование других флокулянтов и ПАВ не приводит к увеличению эффективности электрофлотационного процесса, либо тормозит его. Полученные данные имеют большое практическое значение для организации эффективных технологических процессов очистки раствора MgSO_4 от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} .

ВЫВОДЫ

С целью организации эффективного технологического процесса по очистке маточного раствора производства MgSO_4 от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации установлен показатель оптимального pH среды 6-7, определена

наиболее эффективная плотность тока – 0,4 А/л. Установлено, что наиболее эффективное влияние на процесс извлечения примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} оказывает амфотерный ПАВ – Бетапав А1214.30, показатели степени извлечения соединений Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} достигают 80%, 29% и 36% соответственно.

Наибольшая эффективность извлечения примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} из раствора MgSO_4 достигается в присутствии анионного флокулянта Praestol 2540. Степень извлечения по всем компонентам достигает 98-99% уже на десятой минуте проведения процесса, остаточная концентрация ионов Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} не превышает 0,5, 0,1 и 0,2 мг/л соответственно. Следовательно, очистка MgSO_4 от примесей Fe^{3+} , Al^{3+} и Cr^{3+} методом электрофлотации в присутствии анионного флокулянта Praestol 2540 позволит возвращать маточный раствор в начало процесса на стадию разложения серпентинитомагнезита при производстве сульфата магния, что позволит повысить выход продукта.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке РХТУ им. Д.И. Менделеева в рамках ВИГ-2022-073.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out with the financial support of the Russian Chemical Technical University named after. DI. Mendeleev within the framework of VIG-2022-073.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Передерин Ю.В., Усольцева И.О., Краснощекова Д.В.** Основные технологии получения оксида магния из серпентинита. *Ползунов. вестн.* 2019. № 2. С. 123-127. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.02.024.
2. **Осадченко И.М., Лябин М.П., Романовскова А.Д.** Оксид магния: свойства, методы получения и применения (аналитический обзор). *Природ. системы и ресурсы.* 2018. Т. 8. № 3. С. 5-14. DOI: 10.15688/nsr.jvolsu.2018.3.1.
3. **Сагарунян С.А., Арустамян А.Г., Агамян Э.С., Назарян Э.М., Сагарунян А.С.** Исследование процессов комплексной переработки серпентинитов. *Тр. Колсск. науч. центра РАН.* 2018. Т. 9. № 2-1. С.187-191. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.187-191.
4. **Габдуллин А.Н., Катышев С.Ф., Никоненко Е.А., Вайтнер В.В.** Вскрытие серпентинита азотной кислотой. Сб. тр. Всерос. Науч.-практ. конф. Студ., асп. и молод. уч. с междунар. участ. «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика». Т. 2. Екатеринбург: УрФУ. 2015. С. 30-33.

REFERENCES

1. **Perederin Yu.V., Usol'tseva I.O., Krasnoshchekova D.V.** The main technologies for obtaining magnesium oxide from serpentinite. *Polzunov. Vestn.* 2019. N 2. P. 123-127 (in Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.02.024.
2. **Osadchenko I.M., Lyabin M.P., Romanovskova A.D.** Magnesium oxide: properties, methods of preparation and application (analytical review). *Prirodn. Syst. Resursy.* 2018. V. 8. N 3. P. 5-14 (in Russian). DOI: 10.15688/nsr.jvolsu.2018.3.1.
3. **Sagarunyan S.A., Arustamyan A.G., Agamyan E.S., Nazaryan E.M., Sagarunyan A.S.** Investigation of the processes of complex processing of serpentinites. *Tr. Kol'sk. Nauch. Tsentra RAN.* 2018. V. 9. N 2-1. P. 187-191 (in Russian). DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.187-191.
4. **Gabdullin A.N., Katyshev S.F., Nikonenko E.A., Vajtner V.V.** Autopsy of serpentinite with nitric acid. Sat. tr. Vseros. Scientific and practical conf. Student., asp. and young. uch. with international the plot. "Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources. Nuclear energy". V. 2. Yekaterinburg: UrFU. 2015. P. 30-33. (in Russian).

5. **Дормешкин О.Б., Гаврилюк А.Н., Воробьев Н.И., Черчес Г.Х.** Получение водорастворимого удобрения сульфата магния из доломита. *Тр. БГТУ №3. Химия и технол. неорг. в-в.* 2016. № 3 (185). С. 60-68.
6. **Гаврилюк А.Н., Дормешкин О.Б., Черчес Г.Х.** Физико-химические особенности кислотного разложения доломита. *Изв. НАН Беларуси. Сер. Хим. наук.* 2021. Т. 57. № 1. С. 109-118. DOI: 10.29235/1561-8331-2021-57-1-109-118.
7. **Мачула В.А.** Технология получения сульфата магния. Матер. VIII Респ. Науч.-практ. конф. Молод. уч. и студ. БНТУ «Инженерно-педагогическое образование в XXI веке». Минск: БНТУ. 2012. Ч. 1. С. 73-76.
8. **Широян Д.С., Громова И.В., Элжиркаев Р.А.** Изучение возможности переработки серпентинито-магнезитового сырья Халиловского месторождения на сульфат магния. *Усп. в химии и хим. технологии.* 2014. Т. 28. № 5 (154). С. 122-125.
9. **Петлин И.В., Панкова О.В.** Исследование процесса получения сульфата магния из серпентинитовых руд Халиловского месторождения. *В мире науч. открытий.* 2015. Т. 66. № 6-1. С. 343-351. DOI: 10.12731/wsd-2015-6.1-343-351.
10. **Гурьева В.А.** Особенности химико-минералогического состава серпентинитового техногенного сырья месторождения «Халиловское». Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. «Многопрофильный университет как региональный центр образования и науки». Секция 25 «Проблемы университетского инженерно-строительного образования в регионе: наука и практика». Оренбург: ГОУ ОГУ. 2009. С. 2038-2043.
11. **Байкин Ю.Л., Каренгина Л.Б., Байкенова Ю.Г.** Эффективность использования магнезита в качестве магниевого и известкового удобрения. *Аграрное образование и наука.* 2013. № 3. С. 2-6.
12. **Yang W., Zhang X., Wu L., Rensing C., Xing S.** Short-term application of magnesium fertilizer affected soil microbial biomass, activity, and community structure. *J. Soil Sci. Plant Nutrition.* 2021. V. 21. P. 675-689. DOI: 10.1007/s42729-020-00392-x.
13. **Венгерова М.В., Венгеров А.С.** Минералы и горные породы. Екатеринбург: УрФУ. 2017. 132 с.
14. **Джавадов Г.А., Таранушич В.А.** Испытание сульфата магния различного происхождения для производства комплексных водорастворимых удобрений. *Известия высших учебных заведений. Сев.-Кавказ. Рег. Технич. науки.* 2021. № 4 (212). С. 72-76. DOI: 10.17213/1560-3644-2021-4-72-76.
15. **Колесников В.А., Ильин В.И., Капустин Ю.И., Вараксин С.О., Кисиленко П.Н., Кокарев Г.А.** Электрофлотационная технология очистки сточных вод промышленных предприятий. М.: Химия. 2007. 304 с.
16. **Kuokkanen V., Kuokkanen T., Rämö J., Lassi U.** Recent Applications of Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater - A Review. *Green Sust. Chem.* 2013. V. 3. N 2. P. 89-121. DOI: 10.4236/gsc.2013.32013.
17. **Mohtashami R., Shang J.Q.** Electroflotation for Treatment of Industrial Wastewaters: A focused review. *Environ. Proc.* 2019. V. 6. P. 325-353. DOI: 10.1007/s40710-019-00348-z.
18. **Ksentini I, M. Kotti M., Ben Mansour L.** Effect of liquid phase physicochemical characteristics on hydrodynamics of an electroflotation column. *Desalination Water Treat.* 2014. V. 52. N 16-18. P. 3347-3354. DOI: 10.1080/19443994.2013.800279.
19. **Kyzas G.Z., Matis K.A.** Electroflotation process: A review. *J. Molec. Liq.* 2016. V. 220. P. 657-664. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.04.128.
20. **Azimi A., Azari A., Rezakazemi M., Ansarpour M.** Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewaters: A Review. *ChemBioEng Rev.* 2017. V. 4. N 1. P. 37-59. DOI: 10.1002/cben.201600010.
5. **Dormeshkin O.B., Gavrilyuk A.N., Vorob'ev N.I., Cherches G.Kh.** Obtaining a water-soluble fertilizer of magnesium sulfate from dolomite. *Tr. BGTU N 3. Khim. Tekhnol. Neorg. V-v.* 2016. N 3 (185). P. 60-68 (in Russian).
6. **Gavrilyuk A.N., Dormeshkin O.B., Cherches G.H.** Physico-chemical features of acid decomposition of dolomite. *Izv. Nats. Akad. Nauk Belarusi. Ser. Khim. Nauk.* 2021. V. 57. N 1. P. 109-118 (in Russian). DOI: 10.29235/1561-8331-2021-57-1-109-118.
7. **Machula V.A.** Technology for the production of magnesium sulfate. Mater. VIII Rep. Scientific and practical conf. Young. teacher and student. BNTU "Engineering and pedagogical education in the XXI century". Minsk: BNTU. 2012. Part 1. P. 73-76 (in Russian).
8. **Shiroyan D.S., Gromova I.V., Elzhirkaev R.A.** Study of the possibility of processing serpentinite-magnesite raw materials of the Khalilovsky deposit for magnesium sulfate. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2014. V. 28. N 5 (154). P. 122-125 (in Russian).
9. **Petlin I.V., Pankova O.V.** Investigation of the process of obtaining magnesium sulfate from serpentinite ores of the Khalilovsky deposit. *V Mire Nauchnykh Otkrytiy.* 2015. V. 66. N 6-1. P. 343-351 (in Russian). DOI: 10.12731/wsd-2015-6.1-343-351.
10. **Gur'eva V.A.** Features of the chemical and mineralogical composition of serpentinite technogenic raw materials of the Khalilovskoye deposit. Mater. All-Russian Scientific and Practical Conference "Multidisciplinary University as a regional center of education and science". Section 25 "Problems of university civil engineering education in the region: science and practice". Orenburg: GO OSU. 2009. P. 2038-2043. (in Russian).
11. **Baiykin Yu.L., Karengina L.B., Baykenova Yu.G.** The effectiveness of using magnesite as a magnesium and lime fertilizer. *Agrarnoe Obraz. Nauka.* 2013. N 3. P. 2-6 (in Russian).
12. **Yang W., Zhang X., Wu L., Rensing C., Xing S.** Short-term application of magnesium fertilizer affected soil microbial biomass, activity, and community structure. *J. Soil Sci. Plant Nutrition.* 2021. V. 21. P. 675-689. DOI: 10.1007/s42729-020-00392-x.
13. **Vengerova M.V., Vengerov A.S.** Minerals and rocks. Ekaterinburg: UrFU. 2017. 132 p. (in Russian).
14. **Dzhavadov G.A., Taranushich V.A.** Testing of magnesium sulfate of various origins for the production of complex water-soluble fertilizers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Sev.-Kavkaz. Reg. Tekhn. Nauki.* 2021. N 4 (212). P. 72-76 (in Russian). DOI: 10.17213/1560-3644-2021-4-72-76.
15. **Kolesnikov V.A., P'in V.I., Kapustin Yu.I., Varaksin S.O., Kisilenko P.N., Kokarev G.A.** Electroflotation technology of industrial wastewater treatment. M.: Khimiya. 2007. 304 p. (in Russian).
16. **Kuokkanen V., Kuokkanen T., Rämö J., Lassi U.** Recent Applications of Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater - A Review. *Green Sust. Chem.* 2013. V. 3. N 2. P. 89-121. DOI: 10.4236/gsc.2013.32013.
17. **Mohtashami R., Shang J.Q.** Electroflotation for Treatment of Industrial Wastewaters: A focused review. *Environ. Proc.* 2019. V. 6. P. 325-353. DOI: 10.1007/s40710-019-00348-z.
18. **Ksentini I, M. Kotti M., Ben Mansour L.** Effect of liquid phase physicochemical characteristics on hydrodynamics of an electroflotation column. *Desal. Water Treat.* 2014. V. 52. N 16-18. P. 3347-3354. DOI: 10.1080/19443994.2013.800279.
19. **Kyzas G.Z., Matis K.A.** Electroflotation process: A review. *J. Molec. Liq.* 2016. V. 220. P. 657-664. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.04.128.
20. **Azimi A., Azari A., Rezakazemi M., Ansarpour M.** Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewaters: A Review. *ChemBioEng Rev.* 2017. V. 4. N 1. P. 37-59. DOI: 10.1002/cben.201600010.

21. **Пяе А., Колесникова О.Ю., Аунг Х.Т., Колесников В.А.** Электрофлотационное извлечение смеси ионов меди и цинка из водных растворов в присутствии NH_3 . *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 119-124. DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6322.
21. **Pyae A., Kolesnikova O.Yu., Aung H.T., Kolesnikov V.A.** Electroflotation extraction of a mixture of copper and zinc ions from aqueous solutions in the presence of NH_3 . *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 119-124 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6322.
22. **Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е.** Оценка эффективности использования комплексных коагулянтов в процессах очистки сточных вод машиностроительного производства. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 10. С. 140-146. DOI: 10.6060/ivkkt.20196210.5939.
22. **Kuzin E.N., Kruchinina N.E.** Evaluation of effectiveness of use of complex coagulants for wastewater treatment processes of mechanical engineering. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 10. P. 140-146 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196210.5939.
23. **Малькова Ю.О., Бродский В.А., Колесников В.А.** Повышение эффективности электрофлотационного извлечения ионов Pb (II) из водных растворов в присутствии ионов Al (III) и Fe (III) в качестве коагулянтов. *Вестн. Москов. Унта. Сер. 2. Химия*. 2020. Т. 61. № 2. С. 166-173.
23. **Malkova Yu.O., Brodskiy V.A., Kolesnikov V.A.** Increase of lead (II) ions electroflotation extraction efficiency from water solutions in the presence of aluminum (III) and iron (III) as a coagulant. *Vestn. Moskov. Univ. Ser. 2. Khimiya*. 2020. V. 61. N 2. P. 166-173 (in Russian).
24. **Brodskiy V., Kolesnikov V., Malkova Yu., Gaydukova A.** The effect of high-molecular compounds nature on the electroflotation removal of the metal compounds from electrolyte solutions. *Sep. Purif. Technol.* 2021. V. 279. P. 119689. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119689.
24. **Brodskiy V., Kolesnikov V., Malkova Yu., Gaydukova A.** The effect of high-molecular compounds nature on the electroflotation removal of the metal compounds from electrolyte solutions. *Sep. Purif. Technol.* 2021. V. 279. P. 119689. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119689.
25. **Brodskiy V.A., Gaydukova A.M., Kolesnikov V.A., P'in V.I.** pH effect on the physicochemical characteristics and efficiency of electroflotation extraction of slightly soluble iron subgroup metal compounds from aqueous solutions. *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2017. V. 11. P. 673-679. DOI: 10.1134/S1990793117040145.
25. **Brodskiy V.A., Gaydukova A.M., Kolesnikov V.A., P'in V.I.** pH effect on the physicochemical characteristics and efficiency of electroflotation extraction of slightly soluble iron subgroup metal compounds from aqueous solutions. *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2017. V. 11. P. 673-679. DOI: 10.1134/S1990793117040145.
26. **Иншакова К.А., Бродский В.А., Кладовщикова О.И., Яворский А.Р.** Влияние поверхностно-активных веществ на эффективность электрофлотационного извлечения малорастворимых соединений железа (III), алюминия (III) и хрома (III) из технологического раствора сульфата магния. *Иновационные материалы и технологии: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Молод. уч. Минск: БГТУ*. 2022. С. 430-433.
26. **Inshakova K.A., Brodskiy V.A., Kladovshchikova O.I., Yavorskiy A.R.** The effect of surfactants on the efficiency of electroflotation extraction of poorly soluble compounds of iron (III), aluminum (III) and chromium (III) from a technological solution of magnesium sulfate. *Innovative materials and technologies: mater. International scientific- Tech. conf. Young. UC. Minsk: BSTU*. 2022. P. 430-433 (in Russian).
27. **Иншакова К.А., Бродский В.А., Кладовщикова О.И., Яворский А.Р.** Влияние флокулянтов на эффективность электрофлотационного извлечения малорастворимых соединений железа (III), алюминия (III) и хрома (III) из технологического раствора сульфата магния. *Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Комсомольск-на-Амуре: КНАГУ*. 2022. С. 312-314. DOI: 10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-312.
27. **Inshakova K.A., Brodskiy V.A., Kladovshchikova O.I., Yavorskiy A.R.** The effect of flocculants on the efficiency of electroflotation extraction of poorly soluble compounds of iron (III), aluminum (III) and chromium (III) from a technological solution of magnesium sulfate. *Science, innovation and technology: from ideas to internal. Mater. International scientific- practical conf. Komsomolsk-on-Amur: KNAU*. 2022. P. 312-314 (in Russian). DOI: 10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-312.
28. **Xiao F., Zhang X., Ma J.** Indecisiveness of electrophoretic mobility determination in evaluating Fe (III) coagulation performance. *Sep. Purif. Technol.* 2009. V. 68. N 2. P. 273-278. DOI: 10.1016/j.seppur.2009.06.001.
28. **Xiao F., Zhang X., Ma J.** Indecisiveness of electrophoretic mobility determination in evaluating Fe (III) coagulation performance. *Sep. Purif. Technol.* 2009. V. 68. N 2. P. 273-278. DOI: 10.1016/j.seppur.2009.06.001.
29. **Kolesnikov V.A., Gubin A.F., Kolesnikova O.Y., Perfil'eva A.V.** Raising the efficiency of electroflotation purification of wastewater formed in production of printed-circuit boards to remove copper ions in the presence of complexing agents, surfactants, and flocculants. *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 5. P. 732-737. DOI: 10.1134/S1070427217050111.
29. **Kolesnikov V.A., Gubin A.F., Kolesnikova O.Y., Perfil'eva A.V.** Raising the efficiency of electroflotation purification of wastewater formed in production of printed-circuit boards to remove copper ions in the presence of complexing agents, surfactants, and flocculants. *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 5. P. 732-737. DOI: 10.1134/S1070427217050111.
30. **Staszak K., Wieczorek D., Michocka K.** Effect of Sodium Chloride on the Surface and Wetting Properties of Aqueous Solutions of Cocamidopropyl Betaine. *J. Surfactants Deterg.* 2015. V. 18. N 2. P. 321-328. DOI: 10.1007/s11743-014-1644-8.
30. **Staszak K., Wieczorek D., Michocka K.** Effect of Sodium Chloride on the Surface and Wetting Properties of Aqueous Solutions of Cocamidopropyl Betaine. *J. Surfactants Deterg.* 2015. V. 18. N 2. P. 321-328. DOI: 10.1007/s11743-014-1644-8.
31. **Skender A., Moulai-Mostefa N., Tir M.** Effects of operational parameters on the removal efficiency of nonionic surfactant by electroflotation. *Desal. Water Treat.* 2010. V. 13. N 1-3. P. 213-216. DOI:10.5004/dwt.2010.992.
31. **Skender A., Moulai-Mostefa N., Tir M.** Effects of operational parameters on the removal efficiency of nonionic surfactant by electroflotation. *Desal. Water Treat.* 2010. V. 13. N 1-3. P. 213-216. DOI:10.5004/dwt.2010.992.

Поступила в редакцию (Received) 20.06.2023

Принята к опубликованию (Accepted) 28.12.2023