

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИМЕСИ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ
ИЗ ГАЛИТОВЫХ ОТХОДОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

О.Е. Нисина, С.В. Лановецкий, О.К. Косвинцев, М.А. Куликов

Ольга Евгеньевна Нисина (ORCID 0000-0003-0129-6782), Сергей Викторович Лановецкий (ORCID 0000-0002-2490-1706)*, Олег Константинович Косвинцев (ORCID 0000-0002-1935-9297), Михаил Александрович Куликов (ORCID 0000-0001-8944-9522)

Кафедра химической технологии и экологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, Пермь, Российская Федерация, 614990
E-mail: o.nisina@mail.ru, lsv98@mail.ru *, kosvintsev@bf.pstu.ru, kulikov.74@list.ru

К наиболее распространенным способам обогащения сильвинитовой руды относятся флотационная и галургическая технологии извлечения хлорида калия. Побочными продуктами данных технологий являются галитовые отходы, загрязненные микропримесями сульфата кальция. В представленной работе исследовано влияние способа обогащения сильвинитовой руды на дислокацию сульфата кальция в агрегированных кристаллических частицах галита. Для оценки локализации примесей сульфата кальция в кристаллах галита проведены исследования по влиянию гидромеханической и ультразвуковой обработки суспензии галитовых отходов на остаточное содержание CaSO_4 . Эксперименты проводили с помощью ультразвуковой лабораторной установки, работающей на частоте 22 кГц с интенсивностью ультразвукового воздействия 9,4 Вт/см². Показано, что доля сульфата кальция, находящегося на поверхности солевых агрегатов, образованных при флотационном обогащении, составляет 60,5%, а на агрегатах галита, полученных при галургической переработке – 51,5%. Доля CaSO_4 , прочно удерживаемого за счет адсорбции и окклюзии в кристаллических частицах галита, образованного в процессе флотационного и галургического обогащения сильвинита, составляет около 17% и 29% соответственно. Более крупная доля адсорбированных микропримесей сульфата кальция в галитах галургической технологии объясняется процессами растворения-кристаллизации, которые непрерывно протекают при галургической переработке руды в температурном диапазоне от 90 до 20 °С и способствуют интенсивному захвату примесей галитовыми агрегатами посредством окклюзии и адсорбции. В технологии флотационного обогащения данные процессы не являются доминирующими, в связи с чем более значительная доля примеси CaSO_4 локализуется, в основном, на внешней поверхности частиц галита. В ходе исследований установлено, что для отделения частиц микропримеси сульфата кальция, слабо закрепленного на поверхности агрегатов галита, достаточно гидромеханической обработки суспензии солевых отходов, а для очистки от включений CaSO_4 , внедренных в поверхностный слой галитовых частиц за счет окклюзии и адсорбции, весьма эффективно использовать метод ультразвуковой обработки.

Ключевые слова: твердые галитовые (солевые) отходы, сульфат кальция, гидромеханическая и ультразвуковая обработка

Для цитирования:

Нисина О.Е., Лановецкий С.В., Косвинцев О.К., Куликов М.А. Исследование процесса извлечения примеси сульфата кальция из галитовых отходов различного происхождения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 4. С. 101–107

For citation:

Nisina O.E., Lanovetskiy S.V., Kosvintsev O.K., Kulikov M.A. Study of the extraction process of calcium sulfate impurity from halite wastes of various origins. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 4. P. 101–107

**STUDY OF THE EXTRACTION PROCESS OF CALCIUM SULFATE IMPURITY
FROM HALITE WASTES OF VARIOUS ORIGINS**

O.E. Nisina, S.V. Lanovetskiy, O.K. Kosvintsev, M.A. Kulikov

Olga E. Nisina (ORCID 0000-0003-0129-6782), Sergey V. Lanovetskiy (ORCID 0000-0002-2490-1706)*, Oleg K. Kosvintsev (ORCID 0000-0002-1935-9297), Mikhail A. Kulikov (ORCID 0000-0001-8944-9522)

Department of Chemical Technology and Ecology, Perm National Research Polytechnic University, Komso-molsky Prosp., 29, Perm, 614990, Russia

E-mail: o.nisina@mail.ru, lsv98@mail.ru *, kosvintsev@bf.pstu.ru, kulikov.74@list.ru

The most common sylvinitic ore beneficiation and flotation methods include extraction technology of halurgical potassium chloride. By-products of these technologies are halite waste contaminated microimpurities of calcium sulfate. In the presented work, the influence of the sylvinitic ore beneficiation method on the calcium sulfate dislocation in the aggregated crystalline halite particles has been investigated. To assess the calcium sulfate localization impurities in halite crystals, studies were carried out on the effect of hydromechanical and ultrasonic treatment of halite waste suspension on the residual CaSO_4 content. The experiments were carried out using an ultrasonic laboratory setup operating at a frequency of 22 kHz with an intensity of ultrasonic action of 9.4 W/cm^2 . It was shown that the proportion of calcium sulfate on the salt aggregates surface formed during flotation enrichment is 60.5%, and on halite aggregates obtained during halurgical processing – 51.5%. The ratio of CaSO_4 strongly retained during adsorption and occlusion in crystalline halite particles formed during flotation and halurgical enrichment of sylvinitic is about 17% and 29%, respectively. A larger proportion of adsorbed trace amounts of calcium sulfate in halite halurgical technology was explained by the processes of dissolution-crystallization, which continuously occur during the halurgical processing of ore in the temperature range from 90 to 20 °C and contribute to the intense capture of impurities by halite aggregates through occlusion and adsorption. For flotation technology, these processes are not dominant, and therefore the higher proportion of impurities CaSO_4 localized mainly on the outer surface of the halite particles. In the course of the research, it was found that to separate particles of calcium sulfate microimpurities, loosely fixed on the surface of halite aggregates, it is sufficient to hydromechanically treat a suspension of salt waste, and to remove CaSO_4 inclusions embedded in the surface layer of halite particles due to occlusion and adsorption, it is very effective to use the method ultrasonic processing.

Key words: solid halite (salt) waste, calcium sulfate, hydro-mechanical and ultrasonic treatment

ВВЕДЕНИЕ

В качестве сырья для получения калийных минеральных удобрений используют сильвинит, карналлит, каинит, шенит, лангбейнит, полигалит и некоторые другие минералы. Продуктами их переработки являются такие соли калия, как KCl и K_2SO_4 . При этом основным калийным удобрением признан хлорид калия, доля которого достигает до 90% от общего производства калийных соединений, используемых в аграрном секторе экономики. Технология промышленного извлечения хлорида

калия из минерального сырья сопровождается образованием огромного количества солевых отходов, хранение которых в виде солеотвалов создает экономические и экологические проблемы [1-6].

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей является наиболее крупным месторождением на территории Российской Федерации [7]. Вследствие его длительной эксплуатации скопились миллионы тонн солевых (галитовых) отходов, требующих своевременной утилизации [8-10]. Эффективной переработке и последующему применению галитовых отвалов препятствуют при-

меси глинистого нерастворимого остатка и сульфата кальция. В частности, содержание сульфата кальция, достигающее 3%, при последующей эксплуатации вторичного галитового сырья и продуктов его переработки может привести к выходу из строя технологического оборудования и снижению качества готовых продуктов [11].

Технические и технологические решения, связанные с очисткой галитовых отходов от примесей, реализуемые в современных промышленных схемах, основаны на гидромеханической и химической обработке водно-солевой суспензии галита. Степень очистки отходов с использованием первого способа, как правило, не превышает 50%. Использование второго способа сопровождается увеличением продолжительности стадии и высоким расходом химических реагентов, что существенно осложняет технологию очистки галита от примесей [12, 13]. Таким образом, учитывая сложившуюся ситуацию, исследования, направленные на разработку альтернативных способов очистки твердых галитовых отходов и получение из них вторичных продуктов (соли и раствора хлорида натрия), используемых в производствах кальцинированной и каустической соды, хлора и стекла, являются актуальными.

Из литературных данных известно, что достаточно большой интерес исследователи проявляют к физическим методам интенсификации химико-технологических процессов [14-15]. Одним из перспективных и развивающихся направлений физической обработки минеральных ресурсов является ультразвуковое воздействие [16-19]. В ходе предварительных исследований по влиянию ультразвуковых волн на очистку галитовых отходов от примесей установлено, что обработка ультразвуком водно-солевой галитовой суспензии обеспечивает повышение эффективности процесса очистки от частиц сульфата кальция и существенно снижает количество химических реагентов, необходимых для получения кондиционных продуктов [20-22]. В то же время, в ранее опубликованных работах оценка эффективности удаления примесей из галитовых отходов не рассматривалась с точки зрения того, каким образом формируются данные отходы в зависимости от способа обогащения руды, и как природа формирования отходов влияет на локализацию примесей в агрегированных кристаллических частицах галита.

Таким образом, целью представленной работы явилось исследование процесса извлечения примеси сульфата кальция из галитовых отходов, полученных в процессе галургического и флотационного обогащения сильвинитовой руды.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования были выбраны галитовые отходы, полученные в процессе галургического и флотационного обогащения сильвинита на обогатительных фабриках ПАО «Уралкалий». Химический состав анализируемых проб галургических отходов включал в себя следующие примесные компоненты (мас. %): KCl – 1,5; нерастворимый остаток (Н.О.) – 1,2; MgCl₂ – 0,07; CaSO₄ – 2,1. Химический состав примесей в пробах флотационных галитовых отходов представлен следующими компонентами (мас. %): KCl – 1,8; Н.О. – 1,3; MgCl₂ – 0,12; CaSO₄ – 2,1. Таким образом, исходная концентрация сульфата кальция в пробах, полученных по разным технологиям обогащения, для всех экспериментов оставалась одинаковой.

Для оценки дислокационного расположения примесей сульфата кальция в кристаллах галита проведены исследования по влиянию гидромеханической и ультразвуковой обработки суспензии галитовых отходов на остаточное содержание CaSO₄. Путем рассеивания флотационных и галургических отходов получены пробы с размером частиц 0,63-8,0 мм и массой 1 кг. Далее каждая проба делилась на 3 образца, один из которых оставался контрольным. Первая группа образцов подвергалась гидромеханической обработке (Г/М) с целью определения количества примесных включений с малой степенью закрепления на поверхности крупных кристаллов. Вторая группа образцов подвергалась ультразвуковой обработке (УЗО) для отделения CaSO₄, внедренного в поверхностный слой кристаллов и сосредоточенного в микротрещинах, а также частичного вскрытия агрегатов. При расчете результатов, полученных УЗО, не учитывалась часть примеси, отделяемая Г/М обработкой.

Эксперименты проводили с помощью ультразвуковой лабораторной установки ИЛ 100-б/1, работающей на частоте 22 кГц. Исходя из ранее проведенных исследований, интенсивность УЗ-воздействия для всех опытов была принятой $I = 9,4 \text{ Вт/см}^2$ [21].

Интенсивность гидромеханического воздействия на исследуемую систему выражали через критерий Рейнольдса, который рассчитывался по следующему уравнению:

$$Re_m = \frac{nd^2\rho}{\mu},$$

где n – интенсивность вращения перемешивающего устройства (с⁻¹); d – диаметр перемешивающего устройства (м); ρ – плотность обрабатываемой суспензии (кг/м³); μ – коэффициент динамической вязкости суспензии (Па·с).

Число Рейнольдса для всех опытов составляло $Re = 7500$, длительность ультразвуковой и гидромеханической обработки анализируемой среды – 480 с, отношение жидкой фазы к твердой (Ж:Т) – 5:1. При этом в качестве жидкой фазы обрабатываемой суспензии использовался раствор соответствующих галитовых отходов, насыщенный по хлориду натрия при температуре 25 °С.

После гидромеханической и ультразвуковой обработки суспензию разделяли посредством декантирования. Образовавшийся осадок сушили до постоянной массы при температуре 100 °С и анализировали гравиметрическим методом на содержание сульфат-ионов с последующим пересчетом на сульфат кальция. Анализ поверхности кристаллов галита и дислокации частиц сульфата кальция на ней оценивали методом электронной микроскопии при помощи микроскопа S-3400N «Hitachi» с приставкой для рентгеноспектрального анализа фирмы «Bruker». Съемку и получение микрофотографий образцов осуществляли в режиме детектирования обратно-рассеянных электронов (BSE).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены результаты исследований по влиянию способа обогащения калийных руд на дислокацию примеси сульфата кальция в галитовых отходах. Установлено, что доля частиц сульфата кальция, расположенная на поверхности агрегированных кристаллов галита, полученных в процессе флотационного обогащения руды, выше, чем на аналогичных агломератах галита, сформированных в результате галургической переработки сильвинита (60,5 и 51,5 мас. % соответственно от общего количества сульфата кальция в пробе). В то же время, обратная зависимость прослеживается при рассмотрении доли адсорбированных частиц сульфата кальция в микротрещинах галитовых агрегатов. Так, доля капсулированных примесей CaSO_4 , расположенных в микротрещинах агрегированных частиц NaCl , полученных в процессе флотации, не превышает 17 мас. %. При этом доля капсулированной примеси CaSO_4 в агрегатах галургических отходов достигает уже 29 мас. %.

Более крупная доля адсорбированных микропримесей сульфата кальция в галитовых отходах галургической технологии объясняется процессами растворения-кристаллизации, которые непрерывно протекают при галургической переработке руды в температурном диапазоне от 90 до 20 °С и способствуют интенсивному захвату примесей галитовыми агрегатами посредством окклюзии и адсорбции. При технологии флотационного обогащения

данные процессы не являются доминирующими, в связи с чем более значительная доля примеси CaSO_4 локализуется, в основном, на внешней поверхности частиц галита. Стоит отметить, что концентрация сульфата кальция, прочно удерживаемого внутри кристаллических частиц галита, не сильно отличается для образцов анализируемых отходов галургического и флотационного производства (19,5 и 22,5 мас. % соответственно).

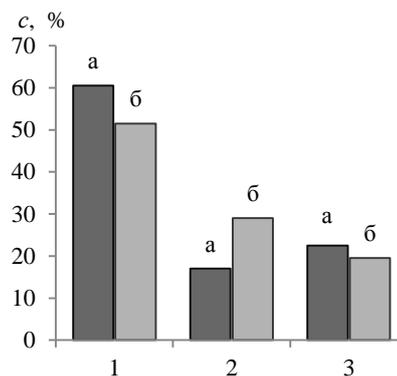


Рис. 1. Содержание примеси CaSO_4 (с), дислоцированной на различных участках образцов флотационных (а) и галургических (б) галитовых отходов: 1 – слабоудерживаемые примеси на поверхности галита; 2 – адсорбированные в микротрещинах галитовых агрегатов; 3 – прочно удерживаемые внутри кристаллической частицы галита

Fig. 1. The content of the CaSO_4 (c) impurity located at various sites of samples of flotation (a) and halurgic (b) halite wastes: 1-weakly retained impurities on the surface of halite; 2 – adsorbed in microcracks of halite aggregates; 3 – firmly held inside the crystalline halite particle

На рис. 2 представлены микрофотографии кристаллической поверхности образцов галитовых отходов флотационного и галургического обогащения руды после гидромеханической обработки, которая позволяет частично отделить от поверхности кристаллов галита слабозакрепленные частицы примеси сульфата кальция.

Анализ микрофотографий показал, что галитовые отходы, полученные в результате галургического обогащения сильвинита, благодаря частичному растворению кристаллов галита, имеют более рыхлую и пористую структуру в сравнении с флотационными отходами. Поверхностные дефекты способствуют образованию вакансий для встраивания более мелких частиц CaSO_4 в структуру галита за счет адсорбции и окклюзии. Это препятствует эффективной очистке галургических отходов от примесей простой гидромеханической обработкой, в то время как использование более эффективного ультразвукового воздействия будет способствовать повышению степени очистки галитовых агрегатов от частиц сульфата кальция.

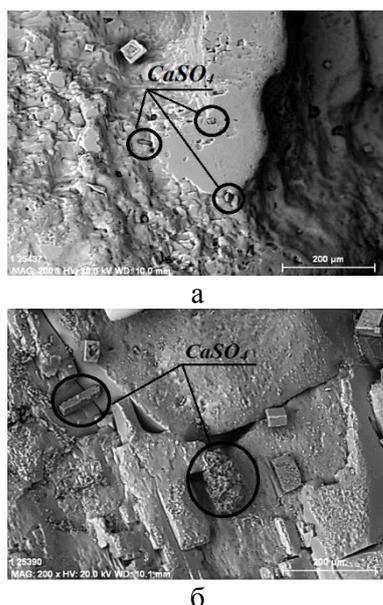


Рис. 2. Микрофотография поверхности кристаллов флотационных (а) и галургических (б) отходов после гидромеханической обработки (детектор BSE)

Fig. 2. Micrograph of the surface of crystals of flotation (a) and halurgic (б) wastes after hydro-mechanical treatment (BSE detector)

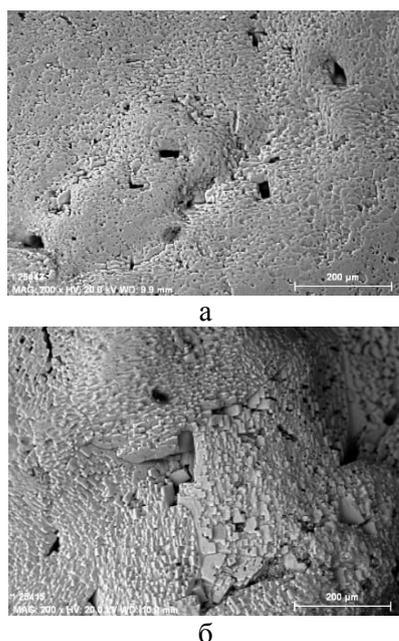


Рис. 3. Микрофотографии поверхности образцов галита, полученных в процессе флотационного (а) и галургического (б) обогащения руды, после ультразвуковой обработки (детектор BSE)
Fig. 3. Micrographs of the halite samples surface obtained in the process of flotation (a) and halurgic (б) ore beneficiation, after ultrasonic treatment (BSE detector)

Далее оценивалось влияние ультразвуковой обработки на эффективность очистки поверхности галита от микропримесей CaSO_4 . На микрофотографиях (рис. 3) показана поверхность галитовых образцов флотационного и галургического переделов после ультразвуковой обработки. Анализ

рисунков показал, что под воздействием ультразвука происходит разрушение поверхностного слоя агрегатов, что в конечном итоге позволяет более качественно осуществлять процессы очистки. Эрозионные процессы на поверхности кристаллов галита, вызванные ультразвуковыми кавитационными эффектами в жидкой среде, обеспечивают отделение капсулированных частиц сульфата кальция и удаление примеси, находящейся в трещинах и сколах поверхности. Рентгеноспектральный элементный анализа поверхности частиц флотационных и галургических отходов, показал, что после ультразвуковой обработки концентрация кальция на поверхности галита не превышала 0,06% и 0,10% соответственно.

На рис. 4 представлены результаты исследований по влиянию гидромеханической и ультразвуковой обработки галитовых отходов, полученных в процессе галургического и флотационного обогащения сивлинитовой руды, на степень очистки от примеси CaSO_4 (φ).

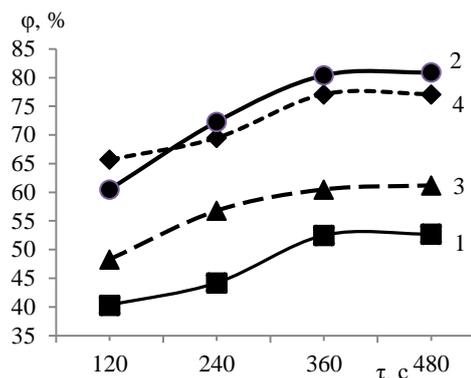


Рис. 4 Влияние способа обработки и природы происхождения галитовых отходов на степень очистки от сульфата кальция: 1, 2 – гидромеханическая и ультразвуковая обработка галургических отходов; 3, 4 – гидромеханическая и ультразвуковая обработка флотационных отходов

Fig. 4. Influence of the cleaning method and the origin nature of halite wastes on the purification degree from calcium sulfate: 1, 2 hydromechanical and ultrasonic treatment of halurgic wastes; 3, 4 - hydromechanical and ultrasonic treatment of flotation wastes

Анализ полученных результатов показал, что большая часть примеси CaSO_4 , дислоцирующаяся непосредственно на поверхности флотационных галитовых отходов, достаточно легко удаляется в результате простой гидромеханической обработки. Благодаря отсутствию процессов перекристаллизации при образовании флотационных отходов и достаточно ровной и однородной поверхности кристаллов галита, значительного внедрения примеси сульфата кальция в микротрещины агрегатов NaCl не происходит. Все это позволяет

обеспечить достаточно высокую эффективность очистки флотационных галитовых отходов от CaSO_4 уже на стадии гидромеханической очистки. Показано, что степень очистки флотационного галита от сульфатов в процессе гидромеханической обработки составляет 60,5%. При этом аналогичный способ очистки галитовых отходов позволяет достичь, примерно, 40%-ной эффективности. Использование же ультразвуковой обработки и в том, и в другом случае значительно увеличивает степень очистки галита от CaSO_4 , достигая значений, превышающих 75%.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований установлена дислокация сульфата кальция во флотационных и галургических отходах. Показано, что доля CaSO_4 , находящегося на поверхности солевых агрегатов, образо-

ванных при флотационной переработке сильвинита, составляет около 60,5%, а на агрегатах галита, полученных при галургической переработке – 51,5%. Доля CaSO_4 , прочно удерживаемого поверхностью соли за счет адсорбции и окклюзии, составляет около 17% и 29% соответственно.

Показано, что для отделения частиц микропримеси сульфата кальция, слабо закрепленных на поверхности агрегатов галита, достаточно гидромеханической обработки суспензии солевых отходов. Для очистки от включений сульфата кальция, внедренных в поверхностный слой галитовых частиц за счет окклюзии и адсорбции, весьма эффективно использовать метод ультразвуковой обработки.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Смычник А.Д., Богатов Б.А., Шемет С.Ф.** Геоэкология калийного производства. Мн.: «Юнипак». 2005. 204 с.
2. **Савон Д.Ю., Шевчук С.В., Шевчук Р.В.** Снижение воздействия отходов калийной промышленности на окружающую среду. *Горн. информ.-аналит. бюл.* 2016. № 8. С. 360-368
3. **Бачурин Б.А., Бабошко А.Ю.** Эколого-геохимическая характеристика отходов калийного производства. *Горный журн.* 2008. № 10. С. 88-91
4. **Березюк М.В., Румянцев А.В.** Экологическое воздействие на окружающую среду при добыче калийной соли в Пермском крае. Сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. Проблемы устойчивого развития российских регионов. Тюмень. 2016. С. 77-81.
5. **Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А.** Основы мониторинга окружающей среды при разработке месторождения калийных солей. *Инж. изыскания.* 2012. № 8. С. 20-30.
6. **Бачурин Б.А., Сметанников А.Ф., Хохрякова Е.С.** Эколого-геохимическая оценка продуктов переработки глинисто-солевых шламов калийного производства. *Совр. пробл. науки и образования.* 2014. № 6. С. 69-76.
7. **Кудряшова А.И.** Минерально-сырьевые ресурсы Пермского Края. Пермь: Книжная площадь. 2006. 464 с.
8. **Мохова Н.В., Тарчигина Н.Ф.** Утилизация и использование отходов производства калийных удобрений. Сб. науч. тр. II междунар. науч.-практ. конф. с науч. шк. для молод. Тверь. 2016. С. 192-193.
9. **Лискова М.Ю.** Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду предприятиями по добыче и обогащению калийно-магниевых солей. *Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегаз. и горное дело.* 2017. Т. 16. № 1. С. 82-88. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.9.
10. **Рузиева З.Т., Кодиров М.М.** Переработка отходов сильвинита. *Журн. науч. публ. асп. и доктор.* 2016. № 9. С. 76-78.

REFERENCES

1. **Smychnik A.D., Bogatov B.A., Shemet S.F.** Geocology of potash production. Mn.:Unipack. 2005. 204 p. (in Russian).
2. **Savon D.Yu., Shevchuk S.V., Shevchuk P.V.** Reducing the impact of waste from potash industry on the environment. *Gorn. Inform.-Analit. Byul.* 2016. N 8. P. 360-368 (in Russian).
3. **Bachurin B.A., Baboshko A.Yu.** Ecological and geochemical characteristics of potash production waste. *Gornyi Zhurn.* 2008. N 10. P. 88-91 (in Russian).
4. **Bereznyuk M.V., Rumyantseva A.V.** Environmental impact on the environment during the extraction of potash salt in the Perm region. Coll. of presentations. Problems of sustainable development of Russian regions. 2016. P. 77-81 (in Russian).
5. **Maximovich N.G., Khayrulina E.A.** The basics of environmental monitoring during development of a potassium salt deposit. *Inzh. Izyskaniya.* 2012. N 8. P. 20-30 (in Russian).
6. **Bachurin B.A., Smetannikov A.F., Khokhryakova E.S.** Ecological and geochemical evaluation of clay-salt slurries of potash ore production. *Sovr. Probl. Nauki Obrazov.* 2014. N 6. P. 69-76 (in Russian).
7. **Kudryashova A.I.** Mineral resources of the Perm Territory. Perm: Knizhnaya Ploshchad'. 2006. 464 p. (in Russian).
8. **Mokhova N.V., Tarchigina N.F.** Utilization and use of wastes from the production of potash fertilizers. Sat. sci. tr. II international scientific and practical conference with a scientific school for youth. Tver. 2016. P. 192-193 (in Russian).
9. **Liskova M.Yu.** Negative impact on the environment caused by companies that mine and process potassium and magnesium salts. *Vest. PNIPU. Geol. Neftegas Gornoe Delo.* 2017. V. 16. N 1. P. 82-88 (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.9.
10. **Ruzieva Z.T., Kodirov M.M.** Recycling sylwinite waste. *Zhurn. Nauch. Publ. Asp. Doktor.* 2016. N 9. P. 76-78 (in Russian).
11. **Nisina O.E., Kozlov S.G., Kulikov M.A., Khudyakov S.G.** Application of the FTIR spectrometry method to the study of salt waste. *Vestn. Tekhnol. Un-ta.* 2017. N 8. V. 20. P. 41-43 (in Russian).

11. **Нисина О.Е., Козлов С.Г., Куликов М.А., Худяков С.Г.** Приложение метода ИК Фурье спектроскопии к исследованию солевых отходов. *Вестн. технол. ун-та*. 2017. № 8. Т. 20. С. 41-43.
12. **Малакей З.А.** Анализ современного состояния проблемы очистки рассолов от сульфатов. *Химия и технол. произв. осн. хим. пром-сти*. 2007. Т. 75. С. 191-196.
13. **Тихонов В.А., Козлов С.Г., Куликов М.А.** Технология содового производства. Пермь: Изд. ПНИПУ. 2016. 135 с.
14. **Черных С.И., Рыбакова О.И., Лебедев Н.М., Жирнова Т.И.** К вопросу изучения влияния ультразвука, магнитных полей и электрического тока на флотацию золота. *Цвет. металлургия*. 2003. № 6. С. 15-17.
15. **Промтов М.А.** Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестн. ТГТУ*. 2008. Т. 14. № 4. С. 861-869.
16. **Глембоцкий В.А., Соколов М.А., Якубович И.А.** Ультразвук в обогащении полезных ископаемых. Алма-Ата: Наука. 1972. 229 с.
17. **Макавецкас А.Р., Башлыкова Т.В., Пахомова Г.А., Филиппов В.И., Лебедев Н.М.** Влияние кавитации на технологические свойства рудного и нерудного минерального сырья. *Цвет. металлы*. 2007. № 3. С. 87-92.
18. **Еранская Т.Ю., Римкевич В.С.** Кавитационный метод обогащения глиноземсодержащего сырья. *Хим. технология*. 2012. Т. 13. № 5. С. 291-296.
19. **Вахрушев В.В., Рупчева В.А., Пойлов В.З., Косвинцев О.К.** Обесшламливание сylvинитовой руды при ультразвуковой обработке. *Инж. вестник Дона*. 2012. № 4. Ч. 2. С. 60-64.
20. **Косвинцев О.К., Нисина О.Е., Лановецкий С.В.** Разработка способа очистки карьерной соли от сульфата кальция. *Хим. технология*. 2014. Т. 15. № 6. С. 321-324.
21. **Нисина О.Е., Лановецкий С.В., Косвинцев О.К.** Влияние интенсивности ультразвукового воздействия на степень очистки галитовых отходов от примеси сульфата кальция. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 12. С. 122-128. DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5850.
22. **Нисина О.Е., Лановецкий С.В., Косвинцев О.К.** Влияние параметров ультразвуковой обработки на остаточное содержание сульфата кальция в твердых галитовых отходах. *Вестн. технол. ун-та*. 2018. Т. 21. № 8. С. 70-73.
12. **Malakey Z.A.** Analysis of the current state of the problem of cleaning brines from sulfates. *Khim. Tekhnol. Proizv. Osn. Khim. Prom-sti*. 2007. V. 75. P. 191-196 (in Russian).
13. **Tikhonov V.A., Kozlov S.G., Kulikov M.A.** Soda technology. Perm: Izd. PNIPU. 2016. 135 p. (in Russian).
14. **Chernykh S.I., Rybakova O.I., Lebedev N.M., Zhirnova T.I.** On the study of the influence of ultrasound, magnetic fields and electric current on gold flotation. *Tsvet. Metallurgiya (Izv. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2003. N 6. P. 15-17 (in Russian).
15. **Promtov M.A.** Prospects of cavitation technologies application for intensification of chemical technological processes. *Vestn. TGTU*. 2008. V. 14. N 4. P. 861-869 (in Russian).
16. **Glembotskiy V.A.** Ultrasound in mineral processing. Alma-Ata: Nauka. 1972. 229 p. (in Russian).
17. **Makavetskas A.R., Bashlykova T.V., Pakhomova G.A., Filippov V.I., Lebedev N.M.** Influence of cavitation on technological properties of ore and non-ore mineral raw materials. *RJNFM*. 2007. N 3. P. 87-92 (in Russian).
18. **Eranskaya T.Yu., Rimkevich V.C.** Cavitation method for enrichment of alumina-containing raw materials. *Khim. Tekhnol.* 2012. V. 13. N 5. P. 291-296 (in Russian).
19. **Vakhrushev V.V., Rupcheva V.A., Poilov V.Z., Kosvintsev O.K.** Sylvinit ore desliming under ultrasonic treatment. *Inzh. Vestn. Dona*. 2012. N 4. Pt. 2. P. 60-64 (in Russian).
20. **Kosvintsev O.K., Nisina O.E., Lanovetskiy S.V.** Development of a method for cleaning the quarry salt from calcium sulfate. *Khim. Tekhnol.* 2014. N 6. P. 321-324 (in Russian).
21. **Nisina O.E., Lanovetskiy S.V., Kosvintsev O.K.** Influence of intensity of ultrasonic action on degree of purification of halite waste from calcium sulphate impurity. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 12. P. 122-128 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5850.
22. **Nisina O.E., Lanovetskiy S.V., Kosvintsev O.K.** Influence of ultrasonic treatment parameters on the residual content of calcium sulfate in solid halite waste. *Vestn. Tekhnol. Un-ta*. 2018. V. 21. N 8. P. 70-73 (in Russian).

Поступила в редакцию 20.07.2021
Принята к опубликованию 27.01.2022

Received 20.07.2021
Accepted 27.01.2022