

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ГАЛИТОВЫХ ОТХОДОВ ОТ ПРИМЕСИ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ

О.Е. Нисина, С.В. Лановецкий, О.К. Косвинцев

Ольга Евгеньевна Нисина, Сергей Викторович Лановецкий *, Олег Константинович Косвинцев

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*, kosvintsevoleg@mail.ru

При обогащении калийно-магниевых руд образуются миллионы тонн твердых галитовых отходов, занимающие огромные территории и представляющие опасность для окружающей среды. Основным полезным компонентом отходов является хлорид натрия, служащий сырьем во многих химических производствах. Наиболее распространенными направлениями переработки являются производства технической поваренной соли и технического раствора хлорида натрия. Эти продукты являются промежуточными и могут в дальнейшем использоваться в различных химических процессах. Получение рассматриваемых продуктов требуемого качества затруднено наличием примесей, таких как CaSO_4 , MgCl_2 , нерастворимые остатки. Наиболее нежелательной примесью является сульфат кальция, концентрация которого может достигать 3%. По литературным источникам определена оптимальная интенсивность ультразвуковой обработки водно-дисперсной среды. Приведены результаты исследований фазового и гранулометрического состава твердых галитовых отходов (карьерной соли и галитового отвала), выявлен характер распределения примеси сульфата кальция в кристаллах галитовых отходов. В статье рассматриваются результаты исследования влияния интенсивности ультразвуковой обработки на остаточное содержание сульфата кальция в галитовых отходах. По результатам исследований установлены длительность и интенсивность ультразвукового воздействия, при котором достигается минимальная концентрация сульфата кальция в получаемом галитовом сырье. Установлен оптимальный режим процесса очистки галитового сырья (интенсивность ультразвукового воздействия, длительность обработки), позволяющие значительно снизить содержание сульфата кальция на стадии механической очистки. Показана потенциальная возможность использования полученных результатов для совершенствования технологии производства технического раствора хлорида натрия с использованием в качестве сырья твердых галитовых отходов производства хлорида калия ПАО «Уралкалий».

Ключевые слова: твердые галитовые отходы, сульфат кальция, ультразвуковая обработка

INFLUENCE OF INTENSITY OF ULTRASONIC ACTION ON DEGREE OF PURIFICATION OF HALITE WASTE FROM CALCIUM SULPHATE IMPURITY

O.E. Nisina, S.V. Lanovetskiy, O.K. Kosvintsev

Olga E. Nisina, Sergey V. Lanovetskiy *, Oleg K. Kosvintsev

Department of Chemical Technology and Ecology, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolskiy ave., 29, Perm, 614990, Russia

E-mail: o.nisina@mail.ru, lsv98@mail.ru*, kosvintsevoleg@mail.ru

When enriching potassium-magnesium ores, millions of tons of solid halite waste are formed, occupying vast areas and posing a danger to the environment. The main useful component of both these wastes is sodium chloride, which serves as a raw material in many chemical industries. The most common processing lines are the production of technical sodium chloride and technical sodium chloride solution. These products are intermediate and can be used in further chemical processes. Obtaining these products of the required quality is hindered by the presence of impurities, such as CaSO_4 , MgCl_2 , insoluble residues. The most undesirable impurity is calcium sulphate, the concentration of which can reach 3%. According to the literature sources, the optimal intensity of ultrasonic treatment of the water-dispersed medium was determined. The results of analyzes of phase and granulometric composition of solid halite waste (quarry salt and halite dump) are presented. The character of distribution of calcium sulfate impurity in crystals of halite waste is revealed. The article examines the results of the study of the influence of the intensity of ultrasonic treatment on the residual content of calcium sulphate in halite waste. Based on the results of the studies, the duration and intensity of the ultrasonic effect were established, at which the minimum concentration of calcium sulfate in the resulting halite raw material is reached. The obtained results allowed to establish the optimal regime of the process of cleaning the halite raw materials (intensity of ultrasonic action, processing time), which allow to significantly reduce the content of calcium sulphate during the mechanical cleaning stage and confirmed the potential possibility of using the obtained results for improving the technology of sodium chloride technical solution production, solid halite waste produced by potassium chloride "Uralkali".

Key words: solid halite waste, calcium sulfate, ultrasonic treatment

Для цитирования:

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

For citation:

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. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 12. P. 122–128

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент проблеме переработки и вторичного использования отходов химической промышленности уделяется особое внимание. Одним из актуальных направлений является переработка галитовых отходов производства хлорида калия. Выбор твердых галитовых отходов (карьерная соль, галитовый отвал) в качестве объекта исследования обоснован как с технической, так и с экологической точек зрения. При переработке и обогащении сырья в калийной промышленности ежегодно образуются миллионы тонн твердых галитовых отходов. Они представляют собой кристаллический хлористый натрий, за-

грязненный примесями хлористого калия и магния, сульфата кальция, нерастворимого остатка и т.д. Одним из наиболее распространенных путей утилизации галитовых отходов является использование их в качестве вторичного сырья при производстве поваренной соли, кальцинированной соды, хлора, хотя их переработка затруднена присутствием сульфатов, хлорида калия и других примесей [1-4]. Наиболее существенным недостатком галитовых отходов является наличие сульфата кальция, концентрация которого может достигать 3%. В настоящий момент существует множество способов снижения концентрации кальция и сульфатов в водных растворах [5-12]. Однако практиче-

ски во всех рассмотренных способах удаление кальция и сульфатов осуществляется уже из приготовленных растворов, что усложняет технологию и требует введения дополнительных стадий очистки.

В рамках Березниковско-соликамского промышленного узла наиболее эффективная переработка галита возможна в производстве кальцинированной соды, где технический раствор хлорида натрия используется в качестве основного сырья.

Одним из современных способов интенсификации химико-технологических процессов является ультразвуковая обработка [13-16]. В ранее проведенных исследованиях оценена возможность очистки твердых галитовых отходов от примеси сульфата кальция с помощью дополнительной ультразвуковой обработки. Исследования показали, что акустическое воздействие существенно снижает концентрацию сульфата в кристаллической фазе галитовых отходов [17].

Для оптимизации и интенсификации процесса очистки проведены исследования влияния мощности ультразвуковой обработки (УЗ-обработки) на остаточное содержание сульфата кальция в галите. Согласно литературным источникам [18], минимальная интенсивность низкочастотного ультразвука, при котором наблюдаются кавитационные явления (порог кавитации) в воде и водных растворах, составляет 2-3 Вт/см². При достижении порогового значения кавитации давления ударных волн при схлопывании кавитационных пузырьков не хватает для достижения максимального уровня эффективности технологического процесса. Поэтому наибольший практический интерес представляет стадия развитой кавитации [18-19], которая достигается в определенном диапазоне интенсивностей. При анализе литературных источников установлено [19-22], что оптимальная интенсивность ультразвуковой обработки водно-дисперсной среды низкой вязкости составляет 5-10 Вт/см². Дальнейшее увеличение интенсивности ультразвукового воздействия может привести к вырождению кавитации, которое характеризуется образованием активного кавитационного облака (большого количества «долгоживущих» пузырьков), снижающего эффективность передачи ультразвуковых колебаний в объем.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования были выбраны: галитовый отвал, поступающий с обога-

тельной фабрики СКРУ-1 и хранящаяся на солеотвалах карьерная соль фабрики БКПРУ-1 ПАО «Уралкалий», используемые для получения технического раствора поваренной соли.

Оценка фазового состава отходов проводилась при помощи рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000. Обработка рентгенограмм производилась с использованием программного обеспечения «XRD 6000/7000 Ver. 5.21». Основным компонентом твердых галитовых отходов является хлорид натрия, наиболее интенсивный пик которого попадает в диапазон углов 2θ , равного 30-35 град., и на его фоне примесные фазы могут не зафиксироваться на рентгенограмме. Для устранения влияния данного факта для сканирования выбраны диапазоны 2θ 10-30 и 35-80 град.

Ультразвуковой обработке подвергали суспензию галитовых отходов с размерами частиц 0,1-0,8 мм. Начальное содержание примеси сульфата кальция в карьерной соли составляло 2,8 мас. %, в галитовом отвале - 2 мас. %. В качестве жидкой фазы использовали раствор соответствующих галитовых отходов, насыщенный по NaCl при 25 °С. Эксперименты проводили при частоте ультразвукового излучения 22 кГц с интенсивностью $I = 4,7; 7,0; 9,4$ Вт/см². Для оценки влияния ультразвуковой обработки на процесс очистки твердых галитовых отходов от примеси сульфата кальция использовалась ультразвуковая лабораторная установка ИЛ 100-6/1 с частотой 22 кГц и регулируемой выходной (акустической) мощностью 750-1500 Вт. Интенсивность ультразвукового воздействия, затраченная на обработку суспензии, определялась по формуле:

$$I = \frac{W_{ак.}}{S_{изл.}}, \quad (1)$$

где $W_{ак.}$ – акустическая мощность установки (Вт), $S_{изл.}$ – площадь излучателя (см²).

Интенсивность перемешивания обрабатываемой среды выражали через модифицированный критерий Рейнольдса по формуле:

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

где ρ – плотность суспензии (кг/м³); n – частота вращения мешалки (с⁻¹); d – диаметр мешалки (м); μ – коэффициент динамической вязкости среды (Па·с). Величина критерия Рейнольдса во всех опытах оставалась постоянной и составляла $Re = 7500$.

Длительность ультразвуковой обработки варьировалась в интервале от 120 до 480 с. Отношение жидкой фазы к твердой (Ж:Т) оставалось постоянным и составляло 5:1. После обработки суспензии мелкие взвешенные частицы вместе с насыщенным раствором отделялись от осадка путем декантирования, а образовавшаяся твердая фаза сушилась и анализировалась на содержание сульфата кальция. В качестве контрольных опытов проводили гидромеханическую обработку проб галитового отвала и карьерной соли без ультразвуковой обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены сглаженные рентгенограммы образца галитового отвала в диапазоне углов 2θ 10-30 град. При сравнении обнаруженных пиков со стандартными рентгенограммами базы данных PDF-4+2012 установлено, что интенсивность и положение пиков образца соответствует фазам – хлорид натрия, хлорид калия и сульфат кальция CaSO_4 в форме ангидрида.

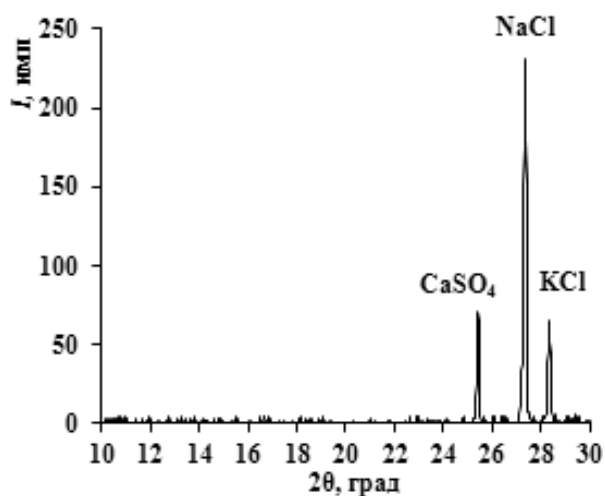


Рис. 1. Рентгенограмма образца «Галитовый отвал» в диапазоне углов 2θ 10-30 град.

Fig. 1. X-ray pattern of the sample "Galite dump" in the range of angles of 2θ 10-30 degrees

Рентгенограмма карьерной соли в диапазоне углов 2θ 10-30 град. показала, что образец карьерной соли состоит из NaCl , KCl и сульфат кальция CaSO_4 . При этом сульфат кальция представлен двумя фазами – ангидрит CaSO_4 и дигидрат $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (рис. 2).

Пики рентгенограмм образцов в диапазоне углов 2θ 35-80 град. характерны только для хлорида натрия.

Наличие двух форм сульфата кальция в карьерной соли связано с открытым способом хранения отходов и регулярным воздействием на них атмосферных осадков.

Для определения первоначального гранулометрического состава галитовых отходов использовался ситовый метод. Для оценки фракционного состава проводился сухой рассев галитовых отходов в их естественном влажном состоянии, а также мокрый рассев.

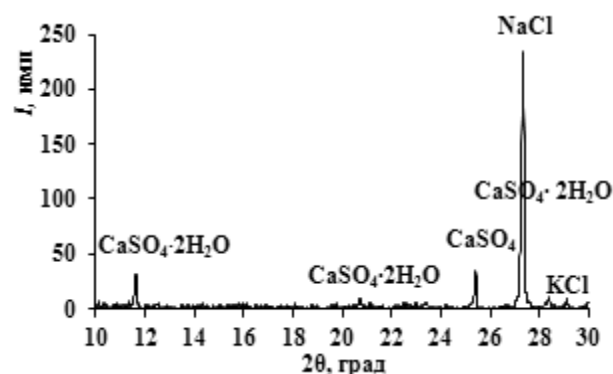


Рис. 2. Рентгенограмма образца «Карьерная соль» в диапазоне углов 2θ 10-30 град.

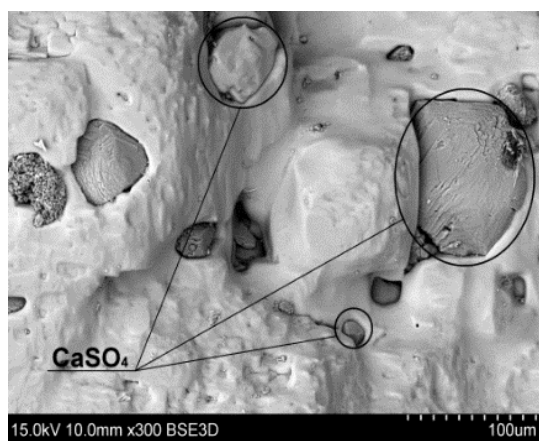
Fig. 2. X-ray pattern of the sample "Quarry salt" in the range of angles of 2θ 10-30 degrees

По результатам анализа установлено, что при мокром расसेве наблюдается увеличение количества мелкой фракции, образовавшейся за счет смыва мелких частиц с поверхности крупных кристаллов галита и разрушения агломератов. Для подтверждения гипотезы проведена фотомикроскопическая съемка поверхности крупных кристаллов галита (рис. 3) с последующим элементным анализом микрокристаллов, расположенных на поверхности образцов. При фотомикроскопической съемке установлено, что поверхность крупных кристаллов галитовых отходов покрыта мелкими кристаллическими частицами со средним размером от 20 до 80 мкм. Элементный анализ показал, что основное вещество, из которого состоят мелкие кристаллы, – это CaSO_4 .

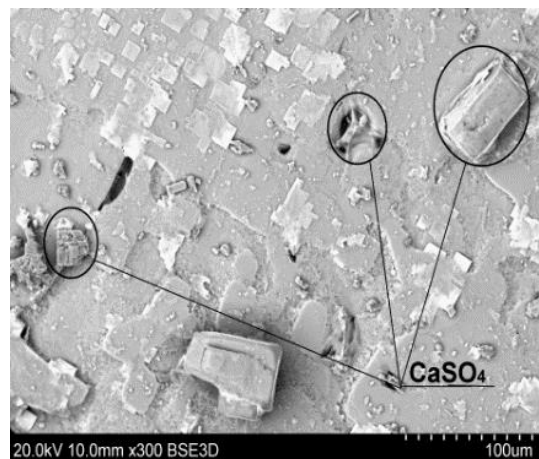
По результатам экспериментальных исследований по влиянию интенсивности и длительности ультразвукового излучения на степень очистки галитовых отходов от сульфата кальция установлено, что положительный эффект от УЗ-обработки наблюдается при использовании в качестве сырья как карьерной соли, так и галитового отвала. Показано, что максимальная степень очистки галитовых отходов достигается в течение

360 с, и дальнейшее увеличение времени УЗ-воздействия не оказывает значительного изменения на процесс удаления CaSO_4 .

В результате выполненных исследований выявлена существенная разница в эффективности очистки анализируемых продуктов. Так, в интервале от 0 до $4,7 \text{ Вт/см}^2$ влияние ультразвуковой обработки на степень очистки карьерной соли выражено очень слабо (рис. 4). Динамика изменения степени очистки от сульфата кальция (D) не превысила и 2% при длительности обработки в течение 360 с. В то же время при тех же условиях обработки пробы галитового отвала эффективность очистки от примесей солей кальция оказалась значительно выше. Динамика изменения степени очистки составила уже 8 %.



а



б

Рис. 3. Микрофотографии исследуемых образцов карьерной соли (а) и галитового отвала (б)

Fig. 3. Microphotographs of the test samples of quarry salt (a) and halite dump (б)

С ростом интенсивности ультразвуковой обработки эффективность очистки карьерной соли резко возрастает и при максимальном значении

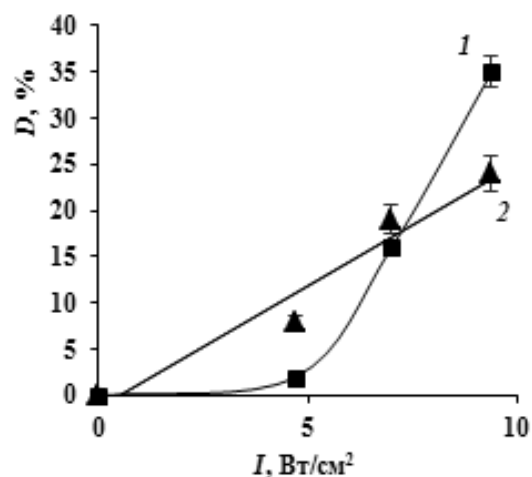


Рис. 4. Влияние интенсивности УЗ-обработки на динамику изменения степени очистки карьерной соли (1) и галитовых отвалов (2) от примесей сульфата кальция

Fig. 4. Effect of intensity of ultrasound treatment on dynamics of changes in the degree of purification of quarry salt (1) and halite dumps (2) from impurities of calcium sulphate

$I = 9,4 \text{ Вт/см}^2$ динамика изменения степени очистки достигает 35%. Рост же динамики изменения степени очистки галитовых отвалов с увеличением интенсивности УЗ обработки не меняется и стабильно, без скачков, повышается до 24%. Такая особенность в удалении примесей кальция с поверхности анализируемых отходов объясняется способом их формирования. Карьерная соль достаточно длительное время хранится на солеотвалах. В результате на ее поверхности протекают процессы перекристаллизации, и частицы сульфата кальция оклюзионно захватываются более крупными агрегатами хлорида натрия. Низкая интенсивность УЗ-обработки не справляется с силами межкристаллического взаимодействия частиц CaSO_4 и NaCl , что и объясняет отсутствие эффективной очистки карьерной соли в интервале от 0 до $4,7 \text{ Вт/см}^2$. Более высокая интенсивность ультразвукового воздействия позволяет частично разрушить поверхность галита, что способствует более интенсивному отделению кристаллических частиц сульфата кальция, оклюзионно захваченных агрегированной поверхностью кристаллов NaCl .

Процесс очистки крупных кристаллов галита от покрывающих его мелких частиц сульфата кальция, по сути, является процессом диспергирования, который протекает в две стадии. На первой стадии под действием интенсивных акустических колебаний, возникающих при пульсациях кавитационных пузырьков, микропоры и трещины на поверхности частицы заполняются насыщенным

паром окружающей жидкости. Далее образовавшиеся полости схлопываются, формируя ударные волны. На второй стадии под действием мощных акустических потоков происходит отделение слабо закрепленных частиц сульфата кальция с поверхности кристаллов галита. Считается [18], что кавитационный процесс является ключевым при диспергировании, т.к. массовое разрушение твердой фазы в суспензии происходит при максимуме давления ультразвукового поля. Так, при интенсивности УЗ-обработки 9,4 Вт/см² в течение 6 мин остаточное содержание примеси сульфата кальция в твердой фазе обрабатываемых суспензий галитовых отходов не превышает 0,5-0,6 мас. %.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований установлен механизм влияния УЗ-обработки на

эффективность очистки карьерной соли и галитовых отвалов.

Показано, что для карьерной соли, благодаря оклюзионному захвату примесей CaSO₄, динамика изменения степени очистки на низких интервалах УЗ-обработки осуществляется менее интенсивно по сравнению с очисткой от CaSO₄ галитовых отвалов. С ростом интенсивности УЗ воздействия происходит частичное разрушение кристаллов галита, и эффективность очистки карьерной соли резко возрастает.

При интенсивности ультразвуковой обработки $I = 9,4 \text{ Вт/см}^2$ в течение 6 мин степень очистки галитовых отходов от примесей CaSO₄ достигает максимальной величины 80-82%.

Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании технологии очистки галитовых отходов от примесей сульфата кальция.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тимонин А.С.** Инженерно-экологический справочник. Т. 3. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой. 2003. 1024 с.
2. **Хуснутдинов В.А., Порфирьева Р.Т.** Производство кальцинированной соды. Казань: КТГУ. 2007. 94 с.
3. **Маланова Н.В., Косинцев В.И., Сечин И.А.** Термодинамический расчет равновесных концентраций ионов кальция при удалении солей временной жесткости с применением реактивов. *Межд. журн. прикл. и фунд. исследований*. 2012. № 1. С. 177-179.
4. **Ходько Е.М., Сероокий Ю.А.** Комплексное использование галитовых отходов калийного производства. *Наука и инновации*. 2016. № 10. С. 40-42.
5. **Савон Д.Ю., Шевчук С.В., Шевчук Р.В.** Снижение воздействия отходов калийной промышленности на окружающую среду. *Горн. информ.-аналит. бюл.* 2016. № 8. С. 360-3681.
6. **Рузиева З.Т., Кодиров М.М.** Переработка отходов сильвинита. *Журн. науч. публик. аспирант. и докторант.* 2016. № 9. С. 76-78.
7. **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: ТГТУ. 2016. С. 192-193.
8. **Yao Zongli, Ying Chengqi, Lu Jianxua.** Removal of K⁺, Na⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ from saline-alkaline water using the Microalga *Scenedesmus Obliquus*. *Chin. J. Oceanol. Limn.* 2013. V. 31. N 6. P. 1248-1256.
9. **Foody B.E.** Patent 8,273,181 US. 2012.
10. **Круглов В.К.** Патент РФ № 2347746. 2009.
11. **Mayer M.J.J.** Patent 6,846,417 US. 2005.
12. **Посторонко А.И., Волков Ю.М.** Применение поверхностно-активных веществ для снижения растворимости гипса при добыче рассола. *Вопр. химии и хим. технологии. Харьков*. 1972. № 26. С. 143-146.
13. **Милушкин В.М., Ильин А.П.** Интенсификация процессов извлечения примесей тяжелых металлов из воды при действии ультразвука в кипящем слое доломита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2009. Т. 8. Вып. 9. С. 103-105.

REFERENCES

1. **Timonin A.S.** Engineering and environmental reference book. V. 3. Kaluga: the publishing house of N.Bochkareva. 2003. 1024 p. (in Russian).
2. **Khusnutdinov V.A., Porfiriyeva R.T.** Manufacture of soda ash. Kazan: KTGU. 2007. 94 p. (in Russian).
3. **Malanova N.V., Kosintsev V.I., Sechin I.A.** Thermodynamic calculation of equilibrium concentrations of calcium ions at removal of temporary hardness salts with the use of reagents. *Mezhd. Zhurn. Prikl. Fund. Issled.* 2012. N 1. P. 177-179 (in Russian).
4. **Khodko E.M., Serookiy Yu.A.** Integrated use of halite waste of potash production. *Nauka Innovats.* 2016. N 10. P. 40-42 (in Russian).
5. **Savon D.Yu., Shevchuk S.V., Shevchuk P.V.** Reducing the impact of waste from potash industry on the environment. *Gorn. Inform. Anal. Bull.* 2016. N 8. P. 360-368 (in Russian).
6. **Ruzieva Z.T., Kodirov M.M.** Recycling sylwinite waste. *Zhurn. Nauch. Publik. Aspr. Doktor.* 2016. N 9. P. 76-78 (in Russian).
7. **Mokhova N.V., Tarchigina N.F.** Utilization and use of wastes from the production of potash fertilizers. Coll. Scient. Works of II Int. Scient. Pract. Conf. with a Scientific School for youth. Tver: TGTU. 2016. P. 192-193 (in Russian).
8. **Yao Zongli, Ying Chengqi, Lu Jianxua.** Removal of K⁺, Na⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ from saline-alkaline water using the Microalga *Scenedesmus Obliquus*. *Chin. J. Oceanol. Limn.* 2013. V. 31. N 6. P. 1248-1256.
9. **Foody B.E.** US Patent 8,273,181 US. 2012.
10. **Kruglov V.K.** RF Patent N 2347746. 2009. (in Russian).
11. **Mayer M.J.J.** US Patent 6,846,417 US. 2005.
12. **Postoronko A.I., Volkov Yu.M.** Application of surfactants to reduce solubility of gypsum in the production of brine. *Vopr. Khim. Khim. Tekhnolog.* Kharkiv. 1972. N. 26. P. 143-146 (in Russian).
13. **Milushkin V.M., Il'in A.P.** Intensification of the processes of extracting heavy metal impurities from water under the action of ultrasound in the fluidized layer of dolomite. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2009. V. 8. N 9. P. 103-105 (in Russian).

14. Santos H.M., Lodeiro C., Capelo-Maninez J.-L. The Power of Ultrasound. *Ultrasound in Chemistry: Analytical Applications*. 2009. P. 1-16.
15. Gallego-Juarez J.A. High-Power Ultrasonic Processing: Recent Developments and Prospective Advances. *Phys. Procedia*. 2010 V. 3. P. 35-47. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.01.006.
16. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S. Development of high efficiency gas cleaning equipment for industrial production using high intensity ultrasonic vibrations. *AJER*. 2015. V. 04. N 08. P. 108-119.
17. Косвинцев О.К., Нисина О.Е., Лановецкий С.В. Разработка способа очистки карьерной соли от сульфата кальция. *Хим. технология*. 2014. № 6. С. 321-324.
18. Хмелев В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйств. Барнаул: АЛГТУ. 2007. 400 с.
19. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестн. Тамбов. гос. тех. ун-та*. 2008. №4. С. 861-869.
20. Агранат Б.А. Основы физики и техники ультразвука. М.: Книга по Требованию. 2012. 352 с.
21. Еранская Т.Ю., Римкевич В.С. Кавитационный метод обогащения глиноземсодержащего сырья. *Хим. технология*. 2012. Т. 13. № 5. С. 291-296.
22. Хмелев С.С. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных сред. Бийск: Центр ультразвуковых технологий. 2011. 102 с.
14. Santos H.M., Lodeiro C., Capelo-Maninez J.-L. The Power of Ultrasound. *Ultrasound in Chemistry: Analytical Applications*. 2009. P. 1-16.
15. Gallego-Juarez J.A. High-Power Ultrasonic Processing: Recent Developments and Prospective Advances. *Phys. Procedia*. 2010 V. 3. P. 35-47. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.01.006.
16. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Dorovskikh R.S. Development of high efficiency gas cleaning equipment for industrial production using high intensity ultrasonic vibrations. *AJER*. 2015. V. 04. N 08. P. 108-119.
17. 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).
18. Khmelev V.N. Ultrasonic multifunctional and specialized apparatuses for the intensification of the technological processes in industry, agriculture and housekeeping. Barnaul: AIGTU. 2007. 400 p. (in Russian).
19. Promtov M.A. Prospects of application of cavitation technologies for intensification of chemical-technological processes. *Vestn. TGTU*. 2008. N 4. P. 861-869 (in Russian).
20. Agranat B.A. Fundamentals of physics and technology of ultrasound. M.: Book on Demand. 2012. 352 p. (in Russian).
21. 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).
22. Khmelev S.C. Increasing the efficiency of ultrasonic cavitation treatment of viscous and disperse media. Biysk: Center for ultrasonic technology. 2011. 102 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 23.05.2018
Принята к опубликованию 29.10.2018

Received 23.05.2018
Accepted 29.10.2018