

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ФЛОТАЦИОННОГО ХЛОРИДА КАЛИЯ ОТ АМИНОВ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

А.С. Подтынова, М.В. Черепанова, С.В. Лановецкий

Александра Сергеевна Подтынова, Мария Владимировна Черепанова (ORCID 000-002-9786-5603), Сергей Викторович Лановецкий (ORCID 0000-0002-2490-1706)*

Кафедра химических технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, Пермь, Российская Федерация, 614990

E-mail: ipodtynova@yandex.ru, syromyatnikova.maria@yandex.ru, lsv98@mail.ru*

В технологии флотационного обогащения сильвинитовой руды широко используются алифатические амины, являющиеся эффективным реагентом-собирателем, обеспечивающим высокое извлечение KCl. Амины, как правило, содержат от 16 до 22 атомов углерода в алифатической цепи, что делает их практически нерастворимыми в воде. Адсорбируясь на поверхности сильвина, амины создают гидрофобную оболочку, обеспечивая всплытие частиц хлорида калия и их отделение от галита. Наличие гидрофобной пленки амина на поверхности флотационного концентрата KCl значительно ухудшает эффективность его прессования и способствует снижению качества готовой продукции. В представленной работе приведены исследования по очистке кристаллической поверхности флотационного хлорида калия от алифатических аминов при помощи ультразвуковой обработки, а также дана оценка прочности гранулированного хлорида калия, полученного из флотационного кристаллизата, подвергнутого ультразвуковой обработке. Показано, что с ростом интенсивности ультразвуковой обработки суспензии флотационного хлорида калия с 20 до 50 Вт/см² массовая доля алифатических аминов в образцах снижается независимо от длительности обработки. При интенсивности ультразвукового облучения 40 Вт/см² в течение 60 с удается максимально снизить концентрацию аминов в готовом кристаллическом продукте со 130 до 32 г/т. Установлено, что с увеличением давления и времени прессования флотационного хлорида калия происходит экстремальное изменение средней статической прочности образующихся гранул. Так, при изменении давления прессования в диапазоне от 3 до 15 МПа при постоянной длительности выдержки в 30 с, статическая прочность гранул достигает максимальной величины при 10 МПа. Исследование влияния параметров ультразвуковой очистки флотационного концентрата хлорида калия от алифатических аминов на процесс прессования кристаллических частиц показали, что 60 с очистка при интенсивности ультразвука 40 Вт/см² позволила достичь максимальных показателей статической прочности гранул $\sigma = 210,2$ Н/гранула и коэффициента упрочнения $K = 1,36$. Результаты представленных исследований могут быть использованы при проектировании технологии прессования флотационного хлорида калия на калийных обогатительных предприятиях.

Ключевые слова: флотационный хлорид калия, алифатические амины, ультразвуковая очистка, грануляция кристаллического продукта

STUDY OF THE PURIFYING FLOTATION POTASSIUM CHLORIDE PROCESS FROM AMINES USING ULTRASONIC TREATMENT

A.S. Podtynova, M.V. Cherepanova, S.V. Lanovetskiy

Aleksandra S. Podtynova, Marija V. Cherepanova (ORCID 000-002-9786-5603), Sergey V. Lanovetskiy (ORCID 0000-0002-2490-1706)*

Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky pr., 29, Perm, 614990, Russia

E-mail: ipodtynova@yandex.ru, syromyatnikova.maria@yandex.ru, lsv98@mail.ru*

In the technology of flotation enrichment of sylvinite ore, aliphatic amines are widely used, which are effective collecting reagents that provide high KCl recovery. Amines typically contain 16 to 22 carbon atoms in the aliphatic chain, making them virtually insoluble in water. By adsorbing on the surface of sylvite, amines create a hydrophobic surface, ensuring the floating of potassium chloride particles and their separation from halite. The presence of a hydrophobic amine film on the surface of the KCl flotation concentrate significantly impairs the efficiency of its pressing and contributes to a decrease in the quality of the finished product. The presented work presents studies on the purification of the crystalline surface of flotation potassium chloride from aliphatic amines using ultrasonic treatment, as well as an assessment of the strength of granular potassium chloride obtained from flotation crystallisate subjected to ultrasonic treatment. It has been shown that with an increase in the intensity of ultrasonic treatment of a suspension of flotation potassium chloride from 20 to 50 W/cm², the mass fraction of aliphatic amines in the samples decreases, regardless of the duration of treatment. With an ultrasonic irradiation intensity of 40 W/cm² for 60 s, it is possible to maximally reduce the concentration of amines in the finished crystalline product from 130 to 32 g/t. It has been established that with increasing pressure and pressing time of flotation potassium chloride, an extreme change in the average static strength of the resulting granules occurs. Thus, when the pressing pressure changes in the range from 3 to 15 MPa with a constant holding time of 30 s, the static strength of the granules reaches its maximum value at 10 MPa. Research on the influence of the effectiveness of parameters of ultrasonic cleaning of potassium chloride flotation concentrate from aliphatic amines on the process of pressing crystalline particles showed that 60 s cleaning at an ultrasound intensity of 40 W/cm² made it possible to achieve maximum static strength of granules $\sigma = 210.2$ N/granule and hardening coefficient $K = 1.36$. The results of the presented studies can be used in the design of technology for pressing flotation potassium chloride at potash concentration plants.

Keywords: flotation potassium chloride, aliphatic amines, ultrasonic cleaning, granulation of crystalline product

Для цитирования:

Подтынова А.С., Черепанова М.В., Лановецкий С.В. Исследование процесса очистки флотационного хлорида калия от аминов методом ультразвуковой обработки. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 3. С. 86–94. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7106.

For citation:

Podtynova A.S., Cherepanova M.V., Lanovetskiy S.V. Study of the purifying flotation potassium chloride process from amines using ultrasonic treatment. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 3. P. 86–94. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7106.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным методом разделения KCl и NaCl при производстве калийных удобрений является пенная флотация [1-3]. В настоящее время он используется более чем в 80% мировой калийной промышленности [4-9].

Для повышения эффективности флотационного извлечения хлорида калия из сylvинитовой руды широко используются первичные алифатические амины и их соли, как более растворимые в воде соединения [10-14]. В процессе флотации амины активно адсорбируются на поверхности частиц хлорида калия, создавая гидрофобную пленку [15]. При этом на поверхности частиц хлорида натрия адсорбция амина протекает менее эффективно, оставляя поверхность галита гидрофильной.

Благодаря описанному механизму, частицы сylvина флотируются, прилипая к пузырькам воздуха, а частицы галита выпадают в осадок.

Несмотря на свою эффективность в технологии флотационного разделения сylvина и галита, амины, оставаясь на поверхности готового продукта в количестве около 130 г/т, снижают качество готового продукта и негативным образом отражаются на способности мелкозернистого хлорида калия к прессованию [16-18]. Амины, благодаря своим гидрофобным характеристикам, затрудняют смачивание и поглощение связующего вещества, что приводит к образованию слабых кристаллических мостиков и снижению прочности гранулированного продукта.

В ряде работ показана эффективность очищения поверхности кристаллических частиц от по-

сторонних примесей путем ультразвуковой обработки. Так, авторы в публикациях [19-21] представили оценку влияния ультразвука на степень очистки галитовых отходов от примеси CaSO_4 . В работах [22, 23] показано влияние ультразвуковой обработки на удаление хлорида натрия из флотоконцентрата KCl и на обесшламливание сильвинитовой руды.

Ряд работ посвящен исследованиям влияния ультразвуковой обработки на диспергацию флокул амина в водной и масляной средах [24-26]. Авторы показали возможность влияния ультразвукового воздействия с заданной интенсивностью и частотой на размер распределенных в жидкой среде флокул амина. Данные исследования скорее могут быть использованы с точки зрения приготовления растворов солянокислых аминов и эффективного их применения на стадии флотации. Взаимосвязь с изучением влияния ультразвуковой обработки на удаление аминов с поверхности KCl в представленных работах не прослеживается.

В исследованиях Вахрушева В.В. [22,23, 27-30], посвященных повышению эффективности процессов обесшламливания и выщелачивания в технологии получения хлорида калия из сильвинитовых руд, описан способ удаления с поверхности кристаллов KCl амина в виде пленки путем ультразвуковой обработки, однако в представленной работе нет оценки влияния параметров ультразвуковой обработки (интенсивность, длительность) на содержание аминов на поверхности частиц хлорида калия. Кроме того, методика идентификации солянокислых аминов на поверхности кристаллов флотоконцентрата KCl с использованием сканирующей электронной микроскопии является качественной оценкой и не позволяет определить количественное содержание солянокислых аминов на поверхности кристаллического продукта.

Таким образом, анализ литературных источников показал, что комплексных исследований влияния параметров ультразвуковой обработки суспензии флотоконцентрата хлорида калия на эффективность очистки его поверхности от пленки амина, а также оценка прочностных характеристик гранулированного продукта, полученного после ультразвукового воздействия, ранее не проводилась.

Исходя из вышеизложенного, целью представленной работы явилось исследование влияния ультразвуковой обработки суспензии флотоконцентрата хлорида калия на эффективность очистки его поверхности от пленки амина, а также оценка прочностных характеристик гранулированного продукта, полученного после ультразвукового воздействия.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исходного сырья использован флотационный хлорид калия, имеющий следующий химический состав (мас. %): KCl – 95,8; NaCl – 2,2; нерастворимый остаток (н.о.) – 0,5; H_2O – 0,5; CaSO_4 – 0,185; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,185; амины – 0,013. Анализ гранулометрического состава исследуемого продукта, представленный на рис. 1, выполнен при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц Malvern Mastersizer 2000. Средний объемный диаметр частиц составил 401,54 мкм.

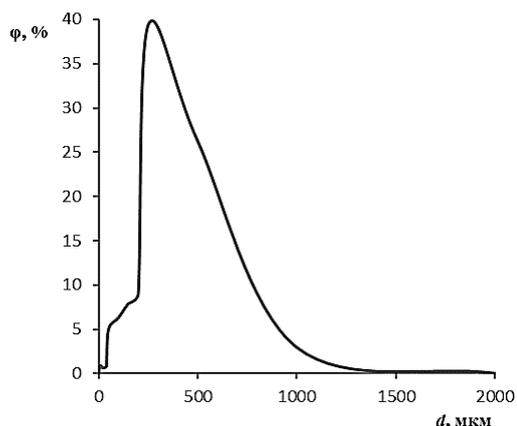


Рис. 1. Гранулометрический состав флотоконцентрата KCl

Fig. 1. Particle size distribution of KCl flotation concentrate

Анализируемый флотационный концентрат KCl в количестве 10 г смешивался при помощи магнитной мешалки Speedsafeby HANNA HI180W-2 с насыщенным по хлориду калия и хлориду натрия раствором при температуре 35 °С. Соотношение Ж:Т для всех опытов составляло 4:1. Для приготовления насыщенных растворов использовали хлорид калия и хлорид натрия марки «ХЧ». Полученную суспензию при постоянном перемешивании с частотой $n \approx 700 \text{ мин}^{-1}$ подвергали ультразвуковой обработке гомогенизатором UP50H. Продолжительность (τ) ультразвуковой обработки (УЗО) варьировалась в диапазоне от 30 до 60 с, интенсивность УЗО (I) изменяли в интервале 20-50 Вт/см². Частота ультразвука во всех опытах оставалась постоянной и составляла $\nu = 30 \text{ кГц}$. После ультразвуковой обработки проводилась декантация раствора от аминов, выделившихся в жидкую фазу в виде пены, и фильтрация суспензии. Влажный кристаллический продукт после стадии фильтрования сушили при температуре 100 °С в электропечи SNOL0,2/1250 с дополнительной вентиляцией воздухом в течение 1 ч.

Измерение остаточного содержания алифатических аминов проводили фотометрическим методом с помощью колориметра фотоэлектрического концентрационного КФК-2. Метод основан на образовании с индикатором метиловым оранжевым в слабнокислой среде ($pH = 3,4-3,6$) комплексного соединения первичных и вторичных аминов, его экстракции хлороформом и измерении оптической плотности окрашенного в лимонно-желтый цвет экстракта при длине волны $\lambda = 420$ нм.

Массовую долю алифатических аминов (c , мас.%) на поверхности хлорида калия рассчитывали по формуле:

$$c = \frac{(D-a) \cdot 100}{b \cdot m \cdot 10^6}, \quad (1)$$

где D – оптическая плотность раствора пробы; a – коэффициент уравнения градуировочной характеристики; 100 – коэффициент пересчета в проценты; b – коэффициент уравнения градуировочной характеристики; m – масса навески хлорида калия, г; 10^6 – коэффициент пересчета граммов в микрограммы.

Морфологию поверхности очищенных ультразвуком частиц хлорида калия и элементный состав оценивали при помощи сканирующего электронного микроскопа «S-3400N» японской фирмы «Hitachi», оснащенного энергодисперсионным спектрометром «XFlash 4010» фирмы «Bruker». Съёмки осуществляли в режиме регистрации обратно-рассеянных электронов.

Изучение влияния условий ультразвуковой обработки на качество гранулированного продукта проводили на лабораторном гидравлическом прессе SL251 при установленных в ходе исследования оптимальных условиях прессования (давление и длительность прессования). Эффективность процесса прессования оценивали по величине статической прочности гранулята и коэффициенту упрочнения.

Методика исследования процесса прессования заключалась в следующем. Навеску флотационного КС1 весом 0,5 г помещали в пресс-форму с внутренним диаметром 10 мм, которую устанавливали в лабораторный гидравлический пресс. Давление сжатия на прессе варьировалось в диапазоне 3 – 15 МПа. Длительность прессования изменялась в интервале 10 – 120 с.

Полученный гранулированный продукт выдерживали в сушильном шкафу в течение 15 мин при $t = 120$ °С. После часового охлаждения гранул при температуре 25 °С проводили измерение их статической прочности на приборе ИПГ-1М и рассчитывали коэффициент упрочнения согласно формуле:

$$K = \frac{\sigma_{УЗО}}{\sigma_0}, \quad (2)$$

где $\sigma_{УЗО}$ – статическая прочность гранул после УЗО, Н/гранула; σ_0 – статическая прочность гранул без УЗО, Н/гранула.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов выполнена оценка влияния параметров ультразвуковой обработки на процесс удаления аминов с поверхности частиц хлорида калия. Результаты исследований по влиянию длительности и интенсивности ультразвуковой обработки на эффективность очистки флотационного концентрата от аминов представлены на рис. 2.

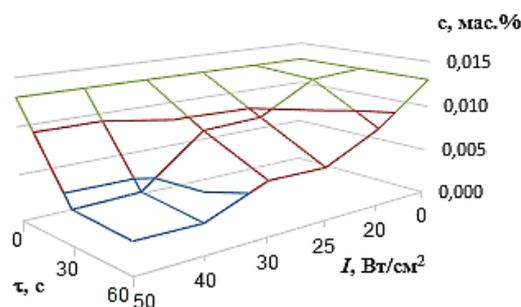


Рис. 2. Влияние длительности и интенсивности УЗ-обработки на массовую долю алифатических аминов в обработанном продукте

Fig. 2. The influence of ultrasonic treatment duration and intensity on the mass fraction of aliphatic amines in the treated product

Из рисунка видно, что с повышением интенсивности УЗО с 20 до 50 Вт/см² массовая доля алифатических аминов в образцах снижается независимо от длительности обработки. При интенсивности обработки более 40 Вт/см² содержание аминов в образцах снижается до 39 г/т (0,0039 мас.%). С увеличением интенсивности УЗО до 50 Вт/см² при времени воздействия 30 с содержание аминов достигает величины 37 г/т или 0,0037 мас.%. При повышении длительности УЗО в 2 раза (до 60 с) и достижении интенсивности в 40 Вт/см² содержание аминов снижается до значения 32 г/т или 0,0032 мас.%. Дальнейшее повышение интенсивности ультразвука не вызывает существенного изменения содержания аминов на поверхности кристаллизата.

Анализ представленных данных показал, что чем выше интенсивность ультразвуковой обработки (≥ 40 Вт/см²), тем меньшее влияние оказывает длительность проведения процесса на эффективность очистки флотоконцентрата хлорида калия от аминов. Благодаря кавитационному эффекту, создаваемому ультразвуковым излучением, пленка амина десорбируется с поверхности кристаллических частиц КС1 и переходит в раствор.

Для оценки эффективности процесса прессования частиц флотационного концентрата хлорида калия, подвергнутого ультразвуковой очистке от алифатических аминов, предварительно проведена вторая серия экспериментов по исследованию влияния давления (p) и времени прессования (τ) необработанных частиц хлорида калия на статическую прочность (σ) полученного гранулята.

В качестве объекта исследования использовали флотационный хлорид калия с концентрацией аминов 130 г/т (0,013 мас.%). Давление прессования варьировалось в диапазоне от 3 до 15 МПа при длительности выдержки под прессом от 10 до 120 с с последующей сушкой полученных гранул в течение 15 мин при температуре 120 °С. Результаты второй серии экспериментов приведены на рис. 3.

Установлено, что с ростом давления и времени прессования флотационного хлорида калия происходит экстремальное изменение средней статической прочности образующихся гранул. Так, при изменении давления прессования с 3 до 15 МПа при постоянной длительности выдержки в 30 с, статическая прочность гранул достигает максимума 155,8 Н/гранула при 10 МПа. С увеличением давления прессования в диапазоне от 3 до 9 МПа кристаллические частицы подвергаются разрушению, что приводит к изменению их формы и уменьшению пористости формирующихся гранул. При этом прочность возрастает с 113,2 до 142,6 Н/гранула.

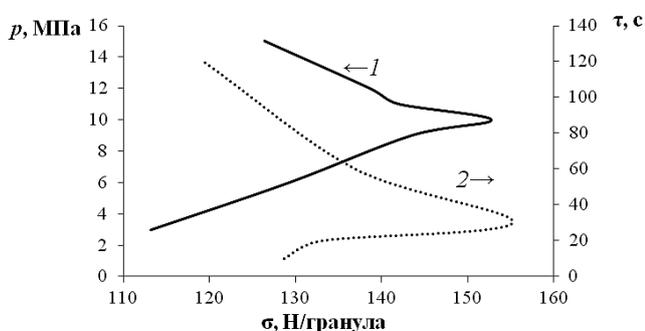


Рис. 3. Влияние давления (1) и времени (2) прессования на статическую прочность гранул хлорида калия
 Fig. 3. The influence of pressing pressure (1) and pressing time (2) on the static strength of potassium chloride granules

При дальнейшем повышении давления в результате упругого и упругопластического сжатия агломератов происходит дальнейшее снижение пористости, характеризующееся более плотной упаковкой частиц хлорида калия. В результате наблюдается формирование наиболее прочных гранул при давлении прессования 10 МПа.

При увеличении давления от 10 до 15 МПа наблюдается снижение статической прочности гранул более чем на 17% со 155,8 до 126,4 Н/гранула,

что вызвано увеличением доли пластической деформации, в результате которой материал теряет свои прочностные характеристики.

Исследование времени прессования проводили при оптимальном давлении 10 МПа. В результате установлено, что максимальная прочность 155,8 Н/гранула получена при времени прессования 30 с.

При кратковременном воздействии нагрузки на образец в течение 10-20 с происходит растяжение материала, что приводит к разрушению спрессованных гранул. Процесс перекристаллизации полностью не успевает закончиться и ограничивается лишь структурными деформациями. Полученные гранулы имеют статическую прочность 128,6 Н/гранула при времени прессования 10 с и 132,9 Н/гранула при 20 с.

При длительности прессования более 30 с отмечено падение прочности гранул на 23% со 155,8 до 119,2 Н/гранула, что связано с возможным переходом к пластическим деформациям и развитием образуемых при этих деформациях дислокаций.

Таким образом, по итогам второй серии экспериментов установлено, что оптимальное давление и время прессования при гранулировании флотационного КСl составляют 10 МПа и 30 с, соответственно.

В третьей серии экспериментов проведены исследования по влиянию эффективности параметров ультразвуковой очистки флотационного концентрата хлорида калия от алифатических аминов на процесс прессования кристаллических частиц. Для всех опытов давление прессования составляло 10 МПа при длительности выдержки образцов в течение 30 с. Результаты исследований по влиянию интенсивности (I) и длительности ультразвуковой очистки (τ) кристаллов хлорида калия на статическую прочность сформированных гранул (σ) и коэффициент их упрочнения (K) представлены в таблице. Из представленных в таблице данных видно, что ультразвуковая очистка кристаллов флотационного концентрата оказывает положительный эффект на статическую прочность и коэффициент упрочнения гранул.

С ростом интенсивности ультразвука в интервале от 20 до 50 Вт/см² при минимальной длительности обработки 30 с отмечен рост статической прочности гранул (от 159,4 до 208,7 Н/гранула) и коэффициента упрочнения (от 1,03 до 1,34). При этом максимальные показатели σ и K (208,7 Н/гранула и 1,35) достигаются для кристаллов, обработанных при интенсивности УЗО $I = 40$ Вт/см².

При длительности УЗО в течение 60 с изменение интенсивности облучения хоть и менее выражено, но также приводит к росту статической прочности гранул в диапазоне от 199,1 до 210,2 Н/гранула и увеличению коэффициента упрочнения в интервале от 1,28 до 1,36. Также, как и при минимальной длительности очистки кристаллов от аминов в течение 30 с, более длительная минутная очистка при интенсивности ультразвука 40 Вт/см² позволила достичь максимальных показателей прочности гранул ($\sigma = 210,2$ Н/гранула и $K = 1,36$).

Таблица

Влияние длительности и интенсивности УЗ-обработки на статическую прочность гранул и коэффициент упрочнения

Table. The influence of duration and intensity of ultrasonic treatment on the static strength of granules and strengthening coefficient

I , Вт/см ²	τ , с	σ , Н/гранула	K
Без УЗО	-	155,0	1,00
20	30	159,4±4,92	1,03
	60	199,1±5,92	1,28
25	30	183,8±2,95	1,19
	60	200,9±4,54	1,30
30	30	183,6±4,13	1,18
	60	196,8±5,14	1,27
40	30	208,7±5,29	1,35
	60	210,2±4,37	1,36
50	30	208,1±6,62	1,34
	60	210,0±2,04	1,35

Таким образом, в исследуемом диапазоне интенсивности и длительности УЗ-очистки кристаллической поверхности флотационного хлорида калия от аминов максимальной прочности гранулята удается достичь при $I = 40$ Вт/см² в течение 60 с. Достигнутая статическая прочность гранул, полученных из очищенного ультразвуком кристаллизата, на 35% превышает прочность гранул, сформированных при оптимальных условиях прессования необработанного кристаллизата с содержанием алифатических аминов 130 г/т.

Известно, что ультразвуковое воздействие оказывает влияние не только на эффективность очистки хлорида калия от аминов, но и на морфологию обрабатываемой поверхности кристаллических частиц КСl, способствуя их более эффективной адгезии. Для оценки влияния ультразвука на поверхность очищаемых кристаллических частиц, навеску флотационного концентрата КСl с содержанием алифатических аминов 130 г/т обработали ультразвуком при интенсивности 40 Вт/см² в течение 60 с, и после отделения кристаллов от жидкой

фазы анализировали состояние кристаллической поверхности на сканирующем электронном микроскопе. На рис. 4 представлена микрофотография обработанной поверхности.



Рис. 4. Микрофотография поверхности кристалла КСl после ультразвуковой обработки ($I = 40$ Вт/см², $\tau = 60$ с), при увеличении 50X

Fig. 4. Microphotograph of the KCl crystal surface after ultrasonic treatment ($I = 40$ W/cm², $\tau = 60$ s), at 50X magnification

Из рисунка видно, что поверхность КСl, подвергнутая ультразвуковой обработке, имеет достаточно шероховатую структуру, что в целом благоприятным образом отражается на эффективности процесса прессования. На поверхности кристалла встречаются вкрапления NaCl, оставшегося после пенной флотации сильвинита, о чем также свидетельствует элементный анализ, полученный при помощи энергодисперсионного спектрометра «XFlash 4010».

Положительный эффект ультразвуковой обработки объясняется тем, что благодаря кавитационному эффекту происходит десорбция аминов с поверхности частиц КСl в жидкую фазу. В результате этого уменьшается, практически в 4 раза (со 130 до 32 г/т), содержание аминов на частицах высушенного хлористого калия. Существенное снижение концентрации алифатических аминов устраняет блокировочный эффект к формированию кристаллических мостиков в процессе прессования кристаллизата, что положительным образом сказывается на увеличении статической прочности гранулированного продукта без введения связующих добавок, снижающих концентрацию основного вещества.

ВЫВОДЫ

В представленной работе приведены исследования по влиянию ультразвуковой обработки суспензии флотационного концентрата хлорида калия на эффективность очистки его поверхности от

алифатических аминов и дана оценка прочностных характеристик гранулированного хлорида калия, полученного в результате процесса прессования кристаллов, подвергнутых УЗ-обработке.

Впервые установлено положительное влияние ультразвуковой обработки пульпы флотационного хлорида калия в кавитационном режиме (частота 30 кГц, интенсивность УЗО 20-50 Вт/см², длительность 30-120 с) на десорбцию аминов с частиц КСl, вследствие чего устраняется эффект блокирования роста частиц КСl и формирования кристаллических мостиков при гранулировании методом прессования, что приводит к повышению статической прочности гранул флотационного КСl.

Показано, что с ростом интенсивности ультразвуковой обработки суспензии флотационного хлорида калия с 20 до 50 Вт/см² массовая доля алифатических аминов в образцах снижается независимо от длительности обработки. При интенсивности ультразвукового облучения 40 Вт/см² с частотой 30 кГц в течение 60 с удается максимально снизить концентрацию аминов в готовом кристаллическом продукте со 130 до 32 г/т.

Установлено, что с увеличением давления и времени прессования флотационного хлорида калия происходит экстремальное изменение средней статической прочности образующихся гранул. Так, при изменении давления прессования в диапазоне

от 3 до 15 МПа при постоянной длительности выдержки в 30 с, статическая прочность гранул достигает максимальной величины при 10 МПа.

Показано, что 60 с очистка при интенсивности ультразвука 40 Вт/см² с частотой 30 кГц позволит достичь максимальных показателей статической прочности гранул $\sigma = 210,2$ Н/гранула и коэффициента упрочнения $K = 1,36$.

Таким образом, в ходе проведенных исследований впервые установлено положительное влияние ультразвуковой обработки пульпы флотационного хлорида калия в кавитационном режиме (частота 30 кГц, интенсивность УЗО 20-50 Вт/см², длительность 30-120 с) на десорбцию аминов с частиц КСl, вследствие чего устраняется эффект блокирования роста частиц КСl и формирования кристаллических мостиков при гранулировании методом прессования, что приводит к повышению статической прочности гранул флотационного КСl.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании технологии прессования флотационного хлорида калия на калийных обогатительных предприятиях.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Дихтневская Л.В., Шломина Л.Ф., Осипова Е.О., Шевчук В.В., Можейко Ф.Ф. Флотационное обогащение калийных руд. *Изв. Нац. АН Беларуси. Сер. хим. наук.* 2019. Т. 55. № 3. С. 277-287. DOI: 10.29235/1561-8331-2019-55-3-277-287.
2. Тетерина Н.Н., Самбук Е.С. Состояние и перспективы развития флотационного обогащения калийных руд. *Горный журн.* 2008. № 10. С. 62-66.
3. Титков С.Н., Пантелеева Н.Н., Гуркова Т.М., Чумакова Т.Г., Коноплев Е.В. Совершенствование технологии флотационного обогащения калийных руд. *Обогащение руд.* 2003. № 3. С. 42-47.
4. Perucca C.F. Potash processing in Saskatchewan - A review of process technologies. *CIM Bull.* 2003. V. 96. N 1070. P. 61-65.
5. Cao Q., Du H., Miller J. D., Wang X., Cheng F. Surface chemistry features in the flotation of KCl. *Miner. Eng.* 2010. V. 23. N 5. P. 365-373 DOI: 10.1016/j.mineng.2009.11.010.
6. Титков С.Н. Развитие технологии флотационного обогащения водорастворимых полезных ископаемых. *Горный журн.* 2007. № 8. С. 20-24.
7. Турко М.Р., Соловьёва Л.А., Любущенко А.Д., Башкардина Е.А. Исследования на обогатимость и разработка технологии обогащения калийных руд петриковского месторождения с повышенным содержанием хлористого магния. *Горный журн.* 2018. № 8. С. 83-88. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.12.
8. Пантелеева Н.Н., Титков С.Н., Бармин И.С., Кривошеин В.М., Бучко В.Ф. Особенности обогащения

REFERENCES

1. Dihtievskaja L.V., Shlomina L.F., Osipova E.O., Shevchuk V.V., Mozheyko F.F. Flotation enrichment of potash ores of different mineralogical composition. *Izv. Nats. AN Belarusi. Ser. Khim. Nauk.* 2019. V. 55. N 3. P. 277-287. DOI: 10.29235/1561-8331-2019-55-3-277-287.
2. Teterina N.N., Sambuk E.S. Status and prospects for the development of flotation enrichment of potash ores. *Gornyi Zhurn.* 2008. N 10. P. 62-66 (in Russian).
3. Titkov S.N., Panteleeva N.N., Gurkova T.M., Chumakova T.G., Konoplyov Ye.V. Improvement of potash ores floatation concentration technology. *Obogashchenie Rud.* 2003. N 3. P. 42-47. (in Russian).
4. Perucca C.F. Potash processing in Saskatchewan - A review of process technologies. *CIM Bull.* 2003. V. 96. N 1070. P. 61-65.
5. Cao Q., Du H., Miller J. D., Wang X., Cheng F. Surface chemistry features in the flotation of KCl. *Miner. Eng.* 2010. V. 23. N 5. P. 365-373 DOI: 10.1016/j.mineng.2009.11.010.
6. Titkov S.N. Development of technology for flotation enrichment of water-soluble minerals. *Gornyi Zhurn.* 2007. N 8. P. 20-24 (in Russian).
7. Turko M.R., Soloviova L.A., Lyubushchenko A.D., Bashkardina E.A. Dressability study and processing technology for the Petrikov deposit potash ore with the increased content of magnesium chloride. *Gornyi Zhurn.* 2018. N 8. P. 83-88 (in Russian). DOI: 10.17580/gzh.2018.08.12.

- калийных руд Гремячинского месторождения. *Обогащение руд*. 2009. № 2. С. 21-25.
9. **Рахматов Х.Б., Шамаев Б.Э., Хайдаров Б.Х., Буранов Ф.Э.** Технология переработки низкосортных сильвинитов на хлорид калия флотационным методом. *Международ. акад. вестн.* 2019. № 11(43). С. 83-85.
 10. **Осипова Е.О., Шломина Л.Ф., Диктievская Л.В., Дроздова Н.А., Шевчук В.В.** Флотация калийных руд с использованием композиций на основе солей высших алифатических аминов. *Изв. Нац. АН Беларуси. Сер. хим. наук.* 2013. № 3. С. 18-22.
 11. **Диктievская Л.В., Осипова Е.О., Шевчук В.В.** Повышение флотационной активности солей высших алифатических аминов - собирателей хлорида калия. *Журн. прикл. химии.* 2012. Т. 85. № 12. С. 2011-2017. DOI: 10.1134/S1070427212120178.
 12. **Кибанова М.С., Пепеляев Н.О., Старостин А.Г.** Анализ современных флотационных пенообразователей в производстве хлорида калия. *Colloquium-J.* 2019. № 16-2 (40). С. 51-56.
 13. **Коновеевских А.В., Гуркова Т.М., Афонина Е.И., Пантелеева Н.Н.** Разработка новых реагентных режимов флотационного обогащения калийных руд. *Горный журн.* 2021. № 4. С. 82-86. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.12.
 14. **Осипова Е.О., Шевчук В.В.** Интенсификация процесса флотации калийной руды при введении гидрофобизатора в состав собирательной смеси хлорида калия. *Изв. Нац. АН Беларуси. Сер. хим. наук.* 2021. Т. 57. № 2. С. 218-225. DOI: 10.29235/1561-8331-2021-57-2-218-225.
 15. **Турко М.Р., Юсевич А.И., Грушова Е.И., Соловьева Л.А., Белькевич Т.И.** Исследование адсорбции амина на солевых минералах из калийной руды гремячинского месторождения. *Горная механика и машиностр.* 2016. № 4. С. 68-77.
 16. **Шевчук В.В., Диктievская Л.В., Шломина Л.Ф., Крутько Н.П., Маркин А.Д.** Разработка технологий кондиционирования мелкодисперсного и гранулированного хлорида калия. *Изв. Нац. АН Беларуси. Сер. хим. наук.* 2019. Т. 55. № 3. С. 288-298. DOI: 10.29235/1561-8331-2019-55-3-288-298.
 17. **Мунин Д.А., Черепанова М.В., Пойлов В.З., Подтынова А.С.** Способ получения агломерированного флотационного хлористого калия. *Вестн. ПНИПУ. Хим. технол. и биотехнол.* 2019. № 4. С. 87-97. DOI: 10.15593/2224-9400/2019.4.08.
 18. **Черепанова М.В., Пойлов В.З., Потапов И.С.** Особенности процесса агломерации пылевидного хлорида калия в кипящем слое. *Фундаментал. исслед.* 2012. № 3. С. 452-456.
 19. **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.
 20. **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. DOI: 10.6060/ivkkt.20226504.6483.
 21. **Лановецкий С.В., Нисина О.Е., Косвинцев О.К.** Разработка технологии получения рассолов хлорида натрия из галитовых отходов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 1. С. 74-82. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6909.
 8. **Panteleeva N.N., Titkov S.N., Barmin I.S., Krivoltsevich V.M., Buchko V.F.** Distinctive features of the gremyachinskoye deposit potassium ores processing. *Obogashchenie Rud.* 2009. N 2. P. 21-25 (in Russian).
 9. **Rakhmatov H.B., Shamaev B.E., Khaidarov B.H., Buronov F.E.** Technology of processing low-grade sylvinites into potassium chloride by flotation method. *Mezhd. Akad. Vest.* 2019. N 11(43). P. 83-85 (in Russian).
 10. **Osipova E.O., Shlomina L.F., Dikhtievskaya L.V., Drozdova N.A., Shevchuk V.V.** Flotation of potash ores using compositions based on higher aliphatic amines' salts. *Izv. Nats. AN Belarusi. Ser. Khim. Nauk.* 2013. N 3. P. 18-22.
 11. **Dikhtievskaya L.V., Osipova E.O., Shevchuk V.V.** Increase in flotation activity of salts of higher aliphatic amines, potassium chloride collectors. *Zhurn. Prikl. Khim.* 2012. V. 85. N 12. P. 2011-2017 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070427212120178.
 12. **Kibanova M.S., Pepelyaev N.O., Starostin A.G.** Analysis of modern flotation foams in the production of potassium chloride. *Colloquium-J.* 2019. N 16-2(40). P. 51-56 (in Russian).
 13. **Konobeevskikh A.V., Gurkova T.M., Afonina E.I., Panteleeva N.N.** New reagent regimes for potash flotation. *Gornyi Zhurn.* 2021. N 4. P. 82-86 (in Russian). DOI: 10.17580/gzh.2021.04.12.
 14. **Osipova E.O., Shevchuk V.V.** Intensification of potash ore flotation process by the introduction of hydrophobizator into the potassium chloride collective mixture. *Izv. Nats. AN Belarusi. Ser. Khim. Nauk.* 2021. V. 57. N 2. P. 218-225. DOI: 10.29235/1561-8331-2021-57-2-218-225.
 15. **Turko M., Yusevich A.I., Grushova E.I., Salauyova L., Bialkevich T.** Research of amine adsorption on salt minerals from potash ore of gremyachinsk deposit. *Gornaya Mekhan. Mashinostr.* 2016. N 4. P. 68-77 (in Russian).
 16. **Shevchuk V.V., Dikhtievskaya L.V., Shlomina L.F., Krutko N.P., Markin A.D.** Development of conditioning technologies of fine-dispersed and granular potassium chloride. *Izv. Nats. AN Belarusi. Ser. Khim. Nauk.* 2019. V. 55. N 3. P. 288-298. DOI: 10.29235/1561-8331-2019-55-3-288-298.
 17. **Munin D.A., Cherepanova M.V., Poylov V.Z., Podtynova A.S.** Producing method agglomerated flotation potassium chloride. *Vest. PNRPU. Khim. Tekhnol. Biotekhnol.* 2019. N 4. P. 87-97 (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9400/2019.4.08.
 18. **Cherepanova M.V., Poylov V.Z., Potapov I.C.** Features of the powdered potassium chloride agglomeration processina fluidized bed. *Fundament. Issled.* 2012. N 3. P. 452-456 (in Russian).
 19. **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. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2018. V. 61. N 12. P. 122-128 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5850.
 20. **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 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226504.6483.
 21. **Lanovetskiy S.V., Nisina O.E., Kosvintsev O.K.** Development of sodium chloride brines technology from halite waste. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2024. V. 67. N 1. P. 74-82 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6909.

22. Вахрушев В.В., Пойлов В.З., Косвинцев О.К. Удаление хлорида натрия из флотоконцентрата KCl при ультразвуковой обработке. *Изв. Томск. политехн. ун-та*. 2013. Т. 322. № 3. С. 15-18.
23. Вахрушев В.В., Рупчева В.А., Пойлов В.З., Косвинцев О.К. Обесшламливание сильвинитовой руды при ультразвуковой обработке. *Инж. Вестн. Дона*. 2012. № 4. Ч. 2. С. 60-64.
24. Осипович А.Э., Вахрушев В.В., Казанцев А.Л., Пойлов В.З. Влияние ультразвуковой обработки на водную эмульсию солянокислого амина. *Вестн. ПНИПУ. Хим. технология и биотехнология*. 2014. № 3. С. 89-96.
25. Вахрушев В.В., Казанцев А.Л., Горожанинова Т.А., Шипков В.Д., Пойлов В.З. Исследование влияния ультразвукового воздействия на диспергацию флокулов стеариламина в аминомасляной эмульсии. *Инж. Вестн. Дона*. 2015. № 4. С. 148-157.
26. Чернышев А.В., Пойлов В.З., Буров В.Е., Кузьминых К.Г. Влияние ультразвуковой обработки на физико-химические характеристики флотационных собирателей, применяемых при обесшламливании сильвинитовых руд. *Обогащение руд*. 2023. № 5. С. 25-30. DOI: 10.17580/or.2023.05.05.
27. Вахрушев В.В., Пойлов В.З., Косвинцев О.К., Федотова О.А. Кинетика обесшламливания сильвинитовой руды при ультразвуковой обработке. *Инж. Вестн. Дона*. 2013. № 2 (25). С. 47-53.
28. Вахрушев В.В., Пойлов В.З., Косвинцев О.К., Кузьминых К.Г. Исследование процесса выщелачивания флотоконцентрата хлорида калия. *Вестн. ПГТУ. Хим. технология и биотехнология*. 2010. № 11. С. 53-61.
29. Вахрушев В.В., Рупчева В.А., Косвинцев О.К., Пойлов В.З. Эффективность применения ультразвуковой обработки для обесшламливания сильвинитовой руды. Сб. доклад. VI Междунар. научн. конф. Актуальные вопросы современной техники и технологии. Липецк: Гравис. 2012. С. 123-124.
30. Вахрушев В.В., Сидельникова Э.Г., Пойлов В.З., Рожков А.В. Способ выщелачивания флотоконцентрата хлорида калия. Тез. докл. XIII регион. научн.-практ. конф. Химия. Экология. Биотехнология. Пермь: ПНИПУ. 2011. С. 140-141.
22. Vakhrushev V.V., Poilov V.Z., Kosvintsev O.K. Removal of sodium chloride from KCl flotation concentrate by ultrasonic treatment. *Izv. Tomsk. Politekh. Un-ta*. 2013. V. 322. N 3. P. 15-18 (in Russian).
23. Vakhrushev V.V., Rupcheva V.A., Poilov V.Z., Kosvintsev O.K. Sylvinite ore desliming under ultrasonic treatment. *Inzh. Vestn. Dona*. 2012. N 4. Pt. 2. P. 60-64 (in Russian).
24. Osipovich A.Je., Vahrushev V.V., Kazancev A.L., Pojlov V.Z. Ultrasonic treatment influence on aqueous emulsion of amine hydrochloride. *Vest. PNRPU. Khim. Tekhnol. Biotekhnol.* 2014. N 3. P. 89-96 (in Russian).
25. Vahrushev V.V., Kazancev A.L., Gorozhaninova T.A., Shipkov V.D., Pojlov V.Z. Study of the effect of ultrasonic treatment on the dispersion of stearylamine floccules in an amino oil emulsion. *Inzh. Vestn. Dona*. 2015. N 4. P. 148-157 (in Russian).
26. Chernyshev A.V., Poylov V.Z., Burov V.E., Kuzminykh K.G. Effect of ultrasonic treatment on physicochemical characteristics of flotation collectors used in sylvinite ore desliming. *Obogashchenie Rud*. 2023. N 10. P. 25-30 (in Russian). DOI: 10.17580/or.2023.05.05.
27. Vahrushev V.V., Poylov V.Z., Kosvintsev O.K., Fedotova O.A. Kinetics of sylvinite ore desliming under ultrasonic treatment. *Inzh. Vestn. Dona*. 2013. N 2 (25). P. 47-53 (in Russian).
28. Vahrushev V.V., Poylov V.Z., Kosvintsev O.K., Kuz'minykh K.G. Study of the leaching process of potassium chloride flotation concentrate. *Vest. PNRPU. Khim. Tekhnol. Biotekhnol.* 2010. N 11. P. 53-61 (in Russian).
29. Vahrushev V.V., Rupcheva V.A., Kosvintsev O.K., Poylov V.Z. Efficiency of ultrasonic treatment for desliming sylvinite ore. Sat. report. VI Int. scient. conf. Current issues of modern engineering and technology. Lipetsk: Gravis. 2012. P. 123-124.
30. Vahrushev V.V., Sidelnikova E.G., Poylov V.Z., Rozhkov A.V. Method for leaching potassium chloride flotation concentrate. Abstract. report XIII region. scient.-pract. conf. Chemistry. Ecology. Biotechnology. Perm: PNIPU. 2011. P. 140-141.

Поступила в редакцию 16.05.2024

Принята к опубликованию 05.11.2024

Received 16.05.2024

Accepted 05.11.2024