

УДК 622.765.061 : 621.9.048.6

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ
СОБИРАТЕЛЯ СИЛЬВИНОВОЙ ФЛОТАЦИИ
НА ЕГО СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА И КОЛЛОИДНОЕ СОСТОЯНИЕ**

В. Е. Буров, В. З. Пойлов, И. С. Потапов, К. Г. Кузьминых

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
E-mail: vladimire.burov@gmail.com, Комсомольский проспект, 29, 614990, г. Пермь, Россия*

Исследованы структурные и коллоидные свойства собирателя — солянокислого амина, обработанного ультразвуком, при сильвиновой флотации. На основании вязкостно-температурных зависимостей рассчитана свободная энергия Гиббса вязкого течения раствора солянокислого амина, необработанного и обработанного ультразвуком. Установлено, что амины, обработанные ультразвуком и добавленные в насыщенные водные растворы солей, более устойчивы к коагуляции. Исходя из результатов синхронного термического анализа, ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа, сделано заключение, что УЗ-обработка солянокислого амина незначительно увеличивает степень кристалличности амина. Результаты работы расширяют представление о влиянии ультразвуковой обработки на изменения структурных и коллоидных свойств собирателя, которые важны при оптимизации процессов флотации, а также для эффективности и устойчивости флотационного производства хлорида калия.

Собиратель, солянокислый амин, сильвиновая флотация, ультразвуковая обработка, динамическая вязкость, энергия активации Гиббса, коагуляция, мицеллярная структура

DOI: 10.15372/FTPRPI20240117
EDN: ZZKLXL

Получение калийных удобрений на основе обогащения сильвинитовых руд осуществляется галургическим и флотационным методами, последний из которых занял ведущее место в отечественной и зарубежной практике обогащения калийных солей [1–3]. Наиболее эффективными и распространенными реагентами-собирателями для флотации калийных солей являются катионоактивные реагенты — соли высших алифатических аминов с длиной углеводородной цепи $C_{12}–C_{20}$ [4]. Флотационная активность и избирательность действия аминов характеризуются склонностью к мицеллообразованию и зависят от их дисперсности, что в итоге определяет адсорбционную активность собирателя и равномерность покрытия им поверхности минералов сильвина [5, 6]. С повышением дисперсности собирателя возрастают гидрофобизирующие и собирательные свойства, а также селективность реагента [7–10]. Кроме того, собиратель в виде крупных мицелл менее доступен для адсорбции на твердой поверхности минеральной частицы, что приводит к повышенному его расходу. Следовательно, эффективность

гидрофобизации солевых минералов солями аминов зависит от их поверхностной активности и агрегатного состояния в растворе. Применение для флотации растворимых солей в качестве жидкой фазы насыщенных солевых растворов способствует интенсивному мицеллообразованию собирателей, их коагуляции и высаливанию, что оказывает значительное влияние на адсорбционную и флотационную активность собирателя, приводит к нерациональному использованию дорогостоящих реагентов [11–14]. В этой связи важны исследования и разработка путей уменьшения мицеллообразования, коагуляции и высаливания аминов в солевых растворах.

Диспергирование и улучшение коллоидных свойств растворов собирателей сильвиновой флотации может осуществляться следующими физико-химическими методами [15, 16]: использованием более разбавленных исходных растворов, применением различных составов фракций собирателя, изменением размера гидрофобного радикала амина, повышением температуры как насыщенного по NaCl–KCl водного раствора, так и исходного раствора собирательной смеси реагентов, интенсивным механическим диспергированием, введением полярно-аполярных органических соединений, например реагентов-вспенивателей и др.

Ультразвуковая обработка (УЗ) — перспективный метод изменения структурных свойств и дисперсного состояния коллоидных растворов флотационных реагентов [17], который в настоящее время используется во многих отраслях промышленности [18–21]. Малоэнергоёмкая и безопасная для человека [22], ультразвуковая обработка способна изменять физико-химические свойства поверхностно активного солянокислого амина: электрокинетический потенциал, адсорбционные и пенообразующие свойства, поверхностное натяжение и др. Это ведёт к изменениям технологических показателей основной сильвиновой флотации. При оптимально подобранных режимах УЗ-воздействия повышается качество и выход пенного продукта, увеличивается извлечение хлорида калия в пенный продукт [7, 23, 24]. К настоящему времени имеется мало сведений о влиянии ультразвука на структурные свойства и коллоидное состояние реагента-собирателя, изучение которого важно для оптимизации процессов флотации хлорида калия. Кроме того, исследование воздействия ультразвука на структурные и коллоидные свойства солянокислого амина актуальны не только в контексте сильвиновой флотации, но и в более широком понимании процесса флотации минеральных руд, где в качестве реагента-собирателя используются поверхностно-активные вещества.

Цель настоящей работы — исследование влияния УЗ-обработки солянокислого амина на его структурные свойства и коллоидное состояние.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приготовление раствора солянокислого амина. Для приготовления раствора солянокислого амина (СКА) применяли амины первичные (дистиллированные) гранулированные, фракции C₁₇–C₂₀ (марка С, тип “летний”, массовое соотношение аминов фракции C₁₈:C₁₆=3.0). Раствор СКА готовили следующим образом: в дистиллированную воду вносили предварительно измельченный в ступке, твердый дистиллированный стеариламин с концентрацией в растворе 0.8 масс. %, и химически чистую соляную кислоту в количестве на 15 % превышающем необходимую для нейтрализации стеариламина. Полученный раствор при постоянном перемешивании термостатировали. Температура составляла 70 °С в течение 90 мин, далее ее доводили до рабочей, равной 60 °С.

Ультразвуковая обработка. Ультразвуковую обработку раствора СКА проводили с помощью лабораторной ультразвуковой установки, представленной на рис. 1.

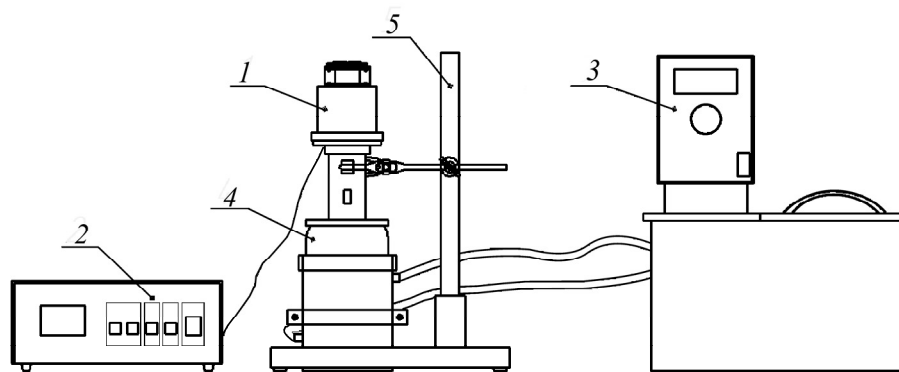


Рис. 1. Схема лабораторной установки для ультразвуковой обработки раствора солянокислого амина: 1 — излучательный элемент; 2 — ультразвуковой генератор; 3 — термостат; 4 — реактор с рубашкой; 5 — штатив

Установка модели УЗТА-0.8/22-ОМУ серии “Волна”, ООО “Центр ультразвуковых технологий” (Россия) имеет номинальную рабочую частоту 22 ± 1.65 кГц. Электронный генератор с таймером и регулятором мощности (40–100 %). При ультразвуковом воздействии полная потребляемая мощность составляет примерно 1600 Вт, активная — 650 Вт, в среду объемом 500 см^3 вводится акустическая мощность 420 Вт (удельная акустическая мощность при данных условиях составляет 0.85 Вт/см^3).

Измерение вязкостно-температурных свойств. Для измерения динамической вязкости и температуры растворов флотационных реагентов использовали вибровискозиметр SV-10, A&D (Япония). Прибор включает в себя сенсор температуры, предназначенный для определения температуры образца. Чтобы получить динамическую вязкость ($\text{мПа} \cdot \text{с}$), отображенное значение на дисплее прибора необходимо разделить на плотность образца (г/см^3). Плотность образцов измеряли ареометрами общего назначения по ГОСТ 1300-74 при заданных температурах.

Синхронный термический анализ, ИК-спектроскопия и рентгенофазовый анализ. Для проведения синхронного термического анализа солянокислых аминов, обработанных и необработанных ультразвуком, использовали прибор STA 449C, Jupiter (Германия) при скорости нагрева образцов $10 \text{ }^\circ\text{C/мин}$.

С целью проведения ИК-спектроскопии СКА, обработанных и необработанных ультразвуком, использовали прибор TENSOR 27, Bruker (США) с приставкой НПВО (спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения) ATR MIRacle, Pike Technologies (США). После получения спектра фона пробу помещали на кристалл приставки НПВО ИК-спектрометра и производили съемку спектров в диапазоне волновых чисел от 4000 до 630 см^{-1} в течение 5 мин, усредненный спектр обрабатывали при помощи программного обеспечения OPUS.

Исследование фазового состава образцов проводили с использованием рентгеновского дифрактометра XRD-7000, Shimadzu (Япония) методом дифракции рентгеновских лучей.

Обработанный и необработанный ультразвуком растворы СКА высушивали при $80 \text{ }^\circ\text{C}$ до постоянной массы, которые затем использовали в качестве измеряемых образцов.

Вычисление энергии активации Гиббса вязкого течения растворов флотационных реагентов. Для характеристики структурных изменений, происходящих в растворах солей аминов, на основании температурной зависимости вязкости растворов рассчитана кажущаяся энергия активации вязкого течения растворов ($\Delta G_{\eta}^{\ddagger}$) солянокислого амина, обработанного и необработанного ультразвуком.

На основе теории Эйринга [25] кажущаяся энергия активации вязкого течения растворов $\Delta G_{\eta}^{\ddagger}$ определяется следующим образом:

$$\Delta G_{\eta}^{\ddagger} = RT \ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right), \quad (1)$$

где

$$\eta_0 = \frac{N_A h \rho}{M}. \quad (2)$$

Здесь ρ — плотность раствора, г/см³; $R = 8.314$ Дж/(моль·К) — газовая постоянная; $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ — число Авогадро; $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; M — молярная масса раствора, г/моль; η — динамическая вязкость раствора при данной температуре, Па·с; T — температура раствора, К; $\Delta G_{\eta}^{\ddagger}$ — энергия активации Гиббса вязкого течения, кДж/моль.

В формулу (1) подставлялись измеренные значения η , T и ρ , после чего проводился расчет $\Delta G_{\eta}^{\ddagger}$.

Измерение динамики коагуляции аминов в солевых растворах. Степень коагуляции высших алифатических аминов определялась по изменению оптической плотности солевого раствора с помощью фотоколориметра КФК-2-УХЛ 4.2 (СССР). Длина волны при измерении составляла 400 нм, толщина кюветы — 50.070 мм. В качестве сравнения использовался насыщенный по NaCl и KCl водный раствор (температура 22 °С, плотность 1.235 г/см³), который изготавливался из солей KCl и NaCl марки “ХЧ”. Далее солевой раствор фильтровался на вакуум-фильтре. Обработанный и необработанный ультразвуком собиратель вводился в насыщенный солевой раствор в виде водного раствора 0.8 %. Концентрация реагентов в солевом растворе составляла $1.2 \cdot 10^{-4}$ моль/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты синхронного термического анализа, ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа образцов СКА, обработанных и необработанных ультразвуком. С целью определения изменений термического поведения (температуры и энтальпии химических реакций в процессе окисления воздухом) образцов солянокислого амина, необработанных и обработанных ультразвуком с максимально возможной удельной акустической мощностью 0.85 Вт/см³ и продолжительностью 150 с, проведен синхронный термический анализ. Результаты наблюдений при синхронном анализе температур плавления солянокислого амина, необработанного и обработанного ультразвуком, представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Температуры плавления солянокислого амина, необработанного и обработанного ультразвуком

Обработка солянокислого амина	Температуры плавления, °С				
Без УЗ-обработки	—	82.0	104.0	163.9	193.5
УЗ-обработка	62.7	71.7	104.1	164.2	193.8

Вместо эндотермического эффекта при температуре 82.0 °С (без УЗ-обработки) появились два эндотермических при температурах 62.7 и 71.7 °С (после УЗ-обработки). Ультразвуковая обработка вызывает разрушение или изменение структуры молекул солянокислого амина, что в свою очередь влияет на его термические свойства. Появление дополнительных эндотермических эффектов при более низких температурах также может указывать на изменение кристаллической структуры солянокислого амина после обработки ультразвуком.

После УЗ-обработки раствора СКА удельной акустической мощностью 0.85 Вт/см^3 и продолжительностью воздействия 150 с для проверки изменения структурных свойств в высушенном амине проведена ИК-спектроскопия. До и после УЗ-обработки корреляция спектров составила 98.77 %, что свидетельствует о том, что основной состав солянокислого амина в обоих образцах остался идентичным. Следовательно, ультразвуковая обработка не привела к значительным изменениям в молекулярной структуре или появлению новых функциональных групп в солянокислом амине. Полученные результаты ИК-спектроскопии показывают, что изменения в термических свойствах, выявленные с помощью синхронного термического анализа (ДСК), могут быть связаны с изменениями в кристаллической структуре или морфологии солянокислого амина после ультразвуковой обработки раствора СКА, но не с химическим составом.

Проведенный рентгенофазовый анализ образцов, представленный на рис. 2, показал, что их дифрактограммы идентичны. Однако после ультразвуковой обработки интенсивность пиков (площадь пиков) выше примерно на 44 %. Ультразвуковая обработка солянокислого амина акустической мощностью до 0.85 Вт/см^3 длительностью воздействия 150 с не приводит к химическим изменениям в составе молекулы, но оказывает влияние на его кристаллическую структуру и термические свойства. Вероятно, ультразвуковая обработка увеличивает степень кристалличности молекул солянокислого амина, что отразилось на увеличении интенсивности дифракционных пиков и появлении дополнительных эндотермических эффектов плавления при более низких температурах (см. табл. 1).

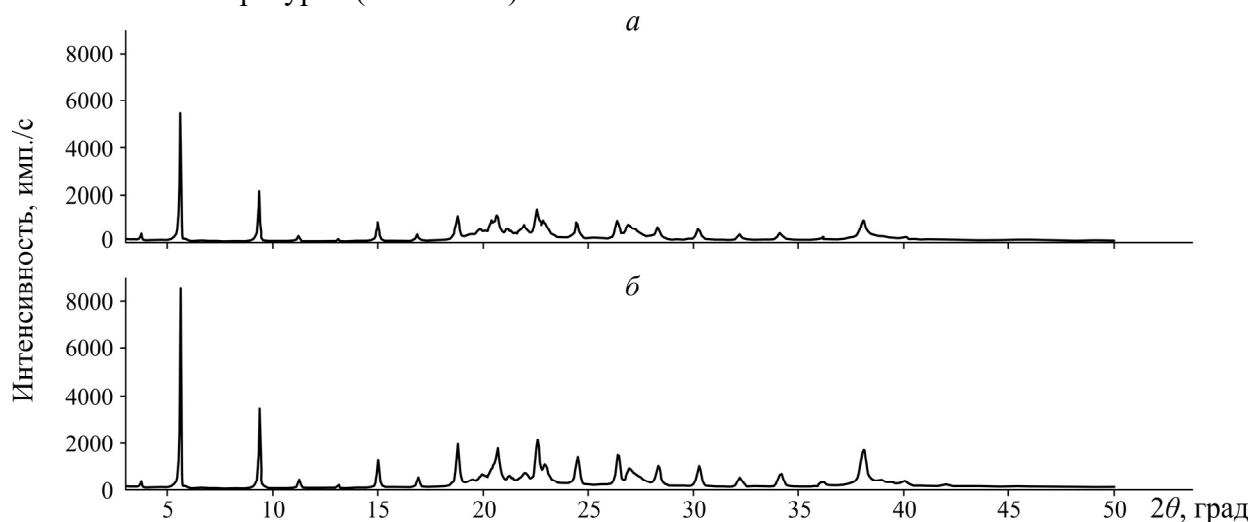


Рис. 2. Дифрактограммы рентгенофазового анализа образца СКА, необработанного (а) и обработанного ультразвуком (б)

Изменение вязкостно-температурных свойств и энергии активации вязкого течения водных растворов солянокислого амина. В табл. 2 представлены результаты измерений динамической вязкости и плотности при разных температурах для растворов СКА, обработанных и необработанных ультразвуком. При максимальной удельной акустической мощности облучения температура раствора повышается на 6°C в сравнении с СКА, необработанным ультразвуком. Динамическая вязкость растворов СКА понижается при максимальной удельной акустической мощности 0.85 Вт/см^3 и достигает $0.69 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, что почти в 9 раз ниже, чем вязкость раствора СКА, необработанного ультразвуком.

ТАБЛИЦА 2. Динамическая вязкость и плотность растворов СКА, необработанных и обработанных ультразвуком длительностью 150 с, при разных температурах

Удельная акустическая мощность УЗ-обработки, Вт/см ³	Температура, °С	Динамическая вязкость, мПа·с	Плотность, г/см ³
Без УЗ-обработки	60	5.95	0.985
0.34	62	2.64	0.983
0.51	63	0.85	0.982
0.68	65	0.77	0.980
0.85	66	0.69	0.979
Без УЗ-обработки	62	5.46	0.983
	63	5.31	0.982
	65	5.00	0.980
	66	4.85	0.979

При действии ультразвука на жидкие среды происходит повышение температуры раствора и диспергирование вещества [26], в данном случае — мицелл амина. Чтобы оценить влияние каждого эффекта, проведены дополнительные исследования по влиянию повышения температуры раствора СКА на динамическую вязкость (табл. 2). Растворы изучались при тех же температурах, которые фиксировались при различных интенсивностях УЗ-обработки. Данные свидетельствуют о том, что повышение температуры незначительно снижает динамическую вязкость растворов реагентов, т. е. наибольший вклад в изменение вязкости вносит ультразвуковая кавитация.

Для характеристики структурных изменений, происходящих в растворах солей аминов под действием УЗ-обработки, на основании температурной зависимости измеренной динамической вязкости рассчитана кажущаяся энергия активации вязкого течения растворов СКА (энергия, требуемая для перехода 1 моля молекул жидкости из начального состояния в текучее состояние при данных давлении и температуре). Как видно из рис. 3, использование УЗ-обработки раствора СКА при разной удельной мощности понижает свободную энергию Гиббса вязкого течения. Если максимальная удельная мощность составляет 0.85 Вт/см³, энергия активации близка к значениям дистиллированной воды при 60 °С.

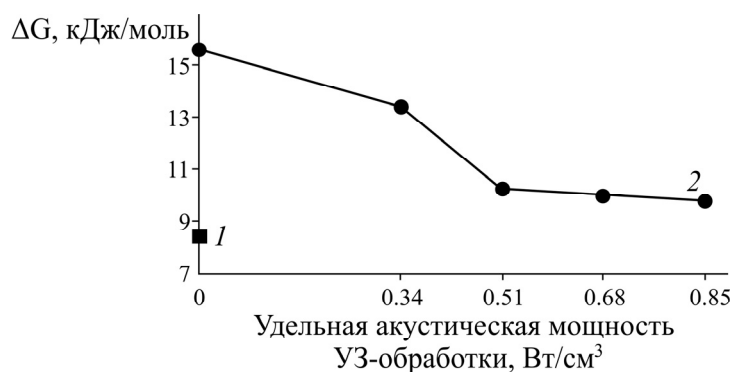


Рис. 3. Энергия активации Гиббса вязкого течения растворов СКА: 1 — дистиллированная вода при 60 °С; 2 — УЗ-обработка раствора СКА

В растворах ПАВ возможно присутствие разнообразных мицеллярных структур, которые образуются в тех или иных условиях [27, 28]. Установлено и подтверждено данными рентгеноструктурного анализа существование двух типов мицелл — сферического и пластинчатого [29]. Форма и размер мицелл зависят от молекулярной природы ПАВ, его концентрации в растворе, температуры раствора, характера межмолекулярных сил, различного рода добавок и т. д. [30]. Образованные сложные мицеллы (цилиндрической или пластинчатой формы) первичных длинноцепочечных аминов обладают меньшим зарядом, чем сферические и сфероидальные. Скорее всего, такие мицеллы ориентируются параллельно друг другу, причем соседние частицы обращены одна к другой своими гидратированными ионогенными группами. В результате такого расположения в водном растворе могут образоваться сплошные мицеллярные слои или сетчатые структуры, состоящие из большого числа нитеобразных пластинчатых агрегатов, что приводит к резкому возрастанию их мутности и вязкости, а также к потере флотационной активности собирателя. Высокие значения η в сравнении с η_0 (рис. 3) свидетельствуют о сложном строении мицеллярной структуры аминов. Вместе с тем ультразвуковая обработка растворов СКА сопровождается снижением энергии активации Гиббса, что указывает на переход от сложной мицеллярной структуры аминов к более простой.

Изменение динамики коагуляции амина. Проведенными ранее исследованиями установлено, что с увеличением удельной акустической мощности УЗ-обработки раствора СКА уменьшаются размеры мицелл амина, наблюдаются изменения в объеме и удельной поверхности мицелл: объем частиц уменьшается, тогда как удельная поверхность мицелл существенно возрастает [7]. Косвенно это свидетельствует о том, что повышается сорбционная и флотационная активность мицелл амина, которые значительно влияют на показатели флотации. Исходя из этого можно предположить, что меньший размер мицелл будет способствовать снижению скорости коагуляции мицелл амина в насыщенном солевом растворе $\text{NaCl} - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$.

На рис. 4 показано влияние УЗ-обработки солянокислого амина на динамику коагуляции аминов, оцениваемую по изменению оптической плотности насыщенного солевого раствора $\text{NaCl} - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$.

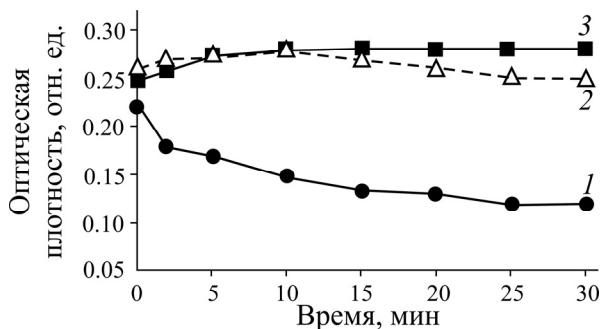


Рис. 4. Влияние УЗ-обработки раствора СКА на оптическую плотность, отражающую динамику коагуляции амина в насыщенном солевом растворе $\text{NaCl} - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$: 1 — без УЗ-обработки; 2, 3 — УЗ-обработка соответственно 0.34 и 0.85 Вт/см³ длительностью 150 с

Для раствора СКА, необработанного ультразвуком, наблюдается снижение оптической плотности с течением времени, что указывает на эффект коагуляции мицелл амина в насыщенном солевом растворе $\text{NaCl} - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$. Введение раствора солянокислого амина, обработанного ультразвуком с различной удельной акустической мощностью, в насыщенный солевой раствор $\text{NaCl} - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$ увеличивает оптическую плотность солевого раствора. Кроме того, при УЗ-обработке раствора СКА с более высокими удельными акустическими мощностями мицеллы амина, добавленные в насыщенный солевой раствор $\text{NaCl} - \text{KCl} - \text{H}_2\text{O}$, находятся в течение длительного времени в более устойчивом к коагуляции состоянии.

Приведенные ранее лабораторные исследования по флотационному разделению компонентов сильвинита (KCl и NaCl) с применением УЗ-обработки раствора СКА указывают на то, что при увеличении акустической мощности до 0.68 Вт/см^3 и различной длительности воздействия (30, 60 и 150 с) извлечение KCl в пенный продукт флотации возрастает относительно контрольных экспериментов, где УЗ-обработка не применялась [7]. Однако при более высокой акустической мощности (0.85 Вт/см^3) наблюдалось небольшое понижение извлечения, которое оставалось выше контрольных показателей. Увеличение эффективности флотации за счет применения УЗ-обработки раствора СКА коррелирует с приведенными данными.

Таким образом, под действием УЗ-обработки раствора СКА меняются структурные свойства и коллоидное состояние ключевого реагента-собирателя основной сильвиновой флотации, что приводит к повышению извлечения KCl в пенный продукт флотации. В перспективе УЗ-обработка собирателя может быть использована для повышения технологических показателей флотации сильвинитовых руд.

ВЫВОДЫ

Исследовано влияние ультразвуковой обработки раствора солянокислого амина, применяемого в качестве собирателя при сильвиновой флотации, на коллоидные и дисперсные свойства раствора собирателя. Выявлено, что при увеличении удельной акустической мощности ультразвукового воздействия повышается температура и снижается динамическая вязкость раствора реагента. Установлено: ультразвуковая обработка растворов солянокислого амина сопровождается снижением энергии активации Гиббса, что указывает на разрушение сложной мицеллярной структуры аминов до более простой; амины, обработанные ультразвуком, добавленные в насыщенные водные растворы солей NaCl–KCl, более устойчивы к коагуляции; ультразвуковая обработка солянокислого амина акустической мощностью 0.85 Вт/см^3 и длительностью воздействия 150 с незначительно повышает степень кристалличности амина, что отражается на увеличении интенсивности дифракционных пиков на рентгенограмме и появлении дополнительных эндотермических эффектов плавления в области температур ниже 100°C .

Применение ультразвуковой обработки раствора солянокислого амина с акустической мощностью до 0.68 Вт/см^3 позволяет увеличить извлечение KCl в пенный продукт относительно контрольных экспериментов.

Приведенные результаты исследований могут найти применение при флотационном обогащении сильвинитовых руд, расширяя представление о влиянии ультразвука на поверхностно-активное вещество — раствор солянокислого амина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang Z., Cheng C., Zhong H., Li L., Guo Z., Yu X., He G., Han H., Deng L., and Fu W. Flotation of sylvite from potash ore by using the Gemini surfactant as a novel flotation collector, *Miner. Eng.*, 2019, Vol. 132. — P. 22–26.
2. Дихтиевская Л. В., Шломина Л. Ф., Осипова Е. О., Шевчук В. В., Можейко Ф. Ф. Флотационное обогащение калийных руд // Изв. НАН Беларуси. Серия хим. наук. — 2019. — Т. 55. — № 3. — С. 277–287.
3. Шакиров Т. Р. Исследование процессов выщелачивания в технологии получения калийных удобрений из карналлитовых пород // Вестн. технол. ун-та. — 2022. — Т. 25. — № 6. — С. 54–57.

4. **Bachurin B. A. and Khokhriakova E. S.** Technogenic-mineral formations of potash processing: forming, transformation, ecological evaluation, European Association Geoscientists and Engineers, 2020. — P. 1–8.
5. **Laskowski J. S.** From amine molecules adsorption to amine precipitate transport by bubbles: A potash ore flotation mechanism, *Miner. Eng.*, 2013, Vol. 45. — P. 170–179.
6. **Li E., Liang H., Du Z., Li D., and Cheng F.** Adsorption process of Octadecylamine Hydrochloride on KCl crystal surface in various salt saturated solutions: Kinetics, isotherm model and thermodynamics properties, *J. Molecular Liquids*, 2016, Vol. 221. — P. 949–953.
7. **Poilov V. Z., Burov V. E., Gallyamov A. N., and Fedotova O. A.** Sonochemical activation of amine hydrochloric acid solution used as a collector in sylvinite ore flotation, *Obogashchenie Rud*, 2021, No. 5. — P. 15–26.
8. **Колпащиков И. Г., Вахрушев В. В., Казанцев А. Л., Потапов И. С., Пойлов В. З., Алиферова С. Н.** Исследование адсорбции активированного солянокислого амина на хлориде калия // *Вестн. ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. — 2015. — № 1. — С. 40–48.
9. **Kariamba K. F. and Kimpiab M.** The effects of partially replacing amine collectors by a commercial frother in a reverse cationic hematite flotation, *Heliyon*, 2021, Vol. 7, No. 3. — e06559.
10. **Кондратьев С. А.** Собирающая сила и избирательность флотационного реагента // *ФТПРПИ*. — 2021. — № 3. — С. 133–147.
11. **Gu G., Song S., Du S., and Wang Y.** The flotation behavior of chalcopyrite in the presence of bentonite in salt water containing Na^+ and K^+ , *Miner. Eng.*, 2022, Vol. 186. — 107767.
12. **Sun K., Nguyen C. V., Nguyen N. N., and Nguyen A. V.** Flotation surface chemistry of water-soluble salt minerals: from experimental results to new perspectives, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, Vol. 309. — 102775.
13. **Титков С. Н.** Активация действия катионных реагентов-собирателей // *Зап. Горн. ин-та*. — 2005. — Т. 165. — С. 191–195.
14. **Du H., Ozdemir O., Wang X., Cheng F., Celik M. S., and Miller J. D.** Flotation chemistry of soluble salt minerals: from ion hydration to colloid adsorption, *Min., Metal. Exp.*, 2014, Vol. 31, No. 1. — P. 1–20.
15. **Bulatovic S. M.** Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: flotation of sulfide ores, Amsterdam, Elsevier, 2007. — 458 p.
16. **Titkov S.** Flotation of water-soluble mineral resources, *Int. J. Miner. Proc.*, 2004, Vol. 74, No. 1. — P. 107–113.
17. **Chen Y., Truong V. N. T., Bu X., and Xie G.** A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, Vol. 60. — 104739.
18. **Mason T. J., Riera E., Vercet A., and Lopez-Buesa P.** 13 — Application of ultrasound, *Emerging Technol. for Food Processing*, ed. D. Sun, London, Academic Press, 2005. — P. 323–351.
19. **Dolatowski Z. J., Stadnik J., and Stasiak D.** Applications of ultrasound in food technology, *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 2007, Vol. 6, No. 3. — P. 88–99.
20. **Козлов Д. Г., Тройных Н. А., Пищачков Д. А.** Применение ультразвука в сельском хозяйстве // *Тенденции развития технических средств и технологий в АПК / Матер. междунар. науч.-практ. конф.* — 2021. — Т. 2. — С. 133–138.
21. **Шибашова С. Ю., Одинцова О. И., Федоринов А. С.** Перспективы технологического применения ультразвука в промышленности // *Российский хим. журн.* — 2014. — Т. 58. — № 2. — С. 90–97.
22. **Федюшко Ю. М., Федюшко М. П.** Экологический характер энергии ультразвуковых волн технологических процессов // *Вестн. аграрной науки Дона*. — 2013. — № 4 (24). — С. 34–39.
23. **Burov V. E., Poilov V. Z., Huang Z., Chernyshev A. V., and Kuzminykh K. G.** Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvin flotation performance, *Min. Sci. Technol. (Russia)*, 2022, Vol. 7, No. 4. — P. 298–309.

24. **Burov V. E., Poilov V. Z., Sazhina M. M., and Huang Z.** Effect of ultrasound on reagent compositions foaming properties used in mineral flotation, *ChemChem Tech.*, 2022, Vol. 65, No. 9. — P. 81–89.
25. **Масимов Э. А., Пашаев Б. Г., Гасанов Г. Ш., Гасанов Н. Г.** Параметры активации вязкого течения воды, тяжелой воды и сверхтяжелой воды // *Успехи современного естествознания*. — 2015. — № 10. — С. 32–35.
26. **Волкова Г. И., Прозорова И. В., Ануфриев Р. В., Юдина Н. В., Муллакаев М. С., Абрамов В. О.** Ультразвуковая обработка нефтей для улучшения вязкостно-температурных характеристик // *Нефтепереработка и нефтехимия*. — 2012. — № 2. — С. 3–6.
27. **Губайдуллин А. Т., Литвинов И. А., Самигуллина А. И., Зуева О. С., Рухлов В. С., Идиятуллин Б. З., Зуев Ю. Ф.** Структура и динамика концентрированных мицеллярных растворов додецилсульфата натрия // *Изв. АН. Серия химическая*. — 2016. — № 1. — С. 158–166.
28. **Смирнова Н. А.** Фазовое поведение и формы самоорганизации растворов смесей поверхностно-активных веществ // *Успехи химии*. — 2005. — Т. 74. — № 2. — С. 138–154.
29. **Александрович Х. М., Можейко Ф. Ф., Коршук Э. Ф., Маркин А. Д.** Физикохимия селективной флотации калийных солей. — Минск: Наука и техника, 1983. — 272 с.
30. **Митгела К.** Мицеллообразование, солюбилизация и микроэмульсии. — М.: Мир, 1980. — 579 с.

Поступила в редакцию 11/І 2024

После доработки 20/І 2024

Принята к публикации 24/І 2024