



## ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-09>

УДК 622.7

**Влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров шламов на эффективность сальвиновой флотации**В.Е. Буров<sup>1</sup> , В.З. Пойлов<sup>1</sup> , Ч. Хуан<sup>2</sup> , А.В. Чернышев<sup>1</sup>, К.Г. Кузьминых<sup>1</sup> <sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация<sup>2</sup> Университет науки и технологии Цзянси, г.о. Ганьчжоу, Китай [vladimire.burov@gmail.com](mailto:vladimire.burov@gmail.com)**Аннотация**

Основной источник калийных удобрений – сальвинитовые руды, состоящие в том числе из галита (NaCl), силикатных и глинисто-карбонатных шламов (глинисто-солевых шламов). Обогащение природных калийных руд главным образом осуществляется флотационным методом, при котором происходит разделение KCl, NaCl и глинисто-солевых шламов.

Исследование направлено на выявление влияния предварительной сонохимической обработки реагентов-депрессоров – КМЦ и крахмала – на динамическую вязкость, размер агрегатов, электрокинетический потенциал растворов этих реагентов и на эффективность сальвиновой флотации. Установлено, что сонохимическая обработка растворов депрессоров уменьшает размер агрегатов молекул крахмала более чем в 133 раза, агрегатов молекул КМЦ – с 6 до 4 нм. Выявлено, что сонохимическое воздействие на раствор анионного КМЦ с увеличением акустической мощности смещает электрокинетический потенциал в область отрицательных значений, при этом сонохимическая обработка любой акустической мощности не влияет на дзета-потенциал неионогенного крахмала. Установлено, что сонохимическая обработка понижает динамическую вязкость растворов КМЦ и крахмала: вязкость раствора КМЦ при максимальной акустической мощности 420 Вт снижается на 44 %, вязкость раствора крахмала при той же акустической мощности ультразвука – на 70 %. Кроме того, предварительная сонохимическая обработка депрессоров сальвиновой флотации способствует увеличению извлечения KCl и снижению содержания шламов во флотационном концентрате. Также показана возможность снижения расхода обработанного ультразвуком депрессора. Полученные результаты целесообразно апробировать в опытно-промышленных условиях.

**Ключевые слова**

обогащение, сальвиновая флотация, ультразвук, депрессор, глинисто-солевой шлам, карбоксиметилцеллюлоза, крахмал, дзета-потенциал, динамическая вязкость, извлечение

**Для цитирования**

Burov V.E., Poilov V.Z., Huang Z., Chernyshev A.V., Kuzminykh K.G. Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvin flotation performance. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):298–309. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-09>

**BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS**

Research paper

**Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvin flotation performance**V. E. Burov<sup>1</sup> , V. Z. Poilov<sup>1</sup> , Z. Huang<sup>2</sup> , A. V. Chernyshev<sup>1</sup>, K. G. Kuzminykh<sup>1</sup> <sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation<sup>2</sup> Jiangxi University of Science and Technology, Guanzhou, China [vladimire.burov@gmail.com](mailto:vladimire.burov@gmail.com)**Abstract**

The main source of potassium fertilizers is sylvinitic ores consisting primarily of halite (NaCl), silicate and clay-carbonate slurries (clay-salt slurries). Processing of natural potash ores is mainly carried out by the flotation method, which separates KCl, NaCl, and clay-salt slurry. The research is aimed at revealing the effect of sonochemical pretreatment of the depressor reagents, CMC and starch, on dynamic viscosity, aggregate size, electrokinetic potential of these reagent solutions and sylvin flotation performance. It has been established



that sonochemical treatment of depressor solutions decreases the size of aggregates of starch molecules by more than 133 times and that of aggregates of CMC molecules from 6 to 4 nm. It has been revealed that sonochemical treatment of anionic CMC solution shifts the electrokinetic potential towards the area of negative values with an increase in acoustic power, while sonochemical treatment of any acoustic power has no effect on the zeta potential of nonionic starch. It has been found that the sonochemical treatment lowers the dynamic viscosity of CMC and starch solutions: the viscosity of CMC solution at a maximum acoustic power of 420 W decreases by 44 % and the viscosity of starch solution at the same acoustic (ultrasonic) power decreases by 70 %. Furthermore, sonochemical pretreatment of sylvan flotation depressors contributes to an increase in KCl recovery and a decrease in the slurry content in the flotation concentrate. The possibility of reducing the consumption of ultrasonic treated depressor is also demonstrated. It is expedient to test the obtained findings in pilot-plant conditions.

### Keywords

processing, sylvan flotation, ultrasound, depressor, clay-salt slurry, carboxymethylcellulose, starch, zeta potential, dynamic viscosity, recovery

### For citation

Burov V.E., Poilov V.Z., Huang Z., Chernyshev A.V., Kuzminykh K.G. Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvan flotation performance. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):298–309. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-09>

## Введение

Калий вместе с фосфором и азотом является важнейшим компонентом минеральных удобрений, повышающим урожайность сельскохозяйственных растений [1–4]. Основным источником калийных удобрений – сильвинитовые руды, состоящие в том числе из галита (NaCl), силикатных и глинисто-карбонатных шламов (глинисто-солевых шламов; далее – ГСШ) [4, 5]. Обогащение природных калийных руд главным образом осуществляется флотационным методом, при котором происходит разделение KCl, NaCl и ГСШ [6–8].

В России расположено одно из крупнейших в мире месторождений сильвинитовых руд – Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, которое богато залежами ценного сильвинита [9, 10]. Однако в настоящее время часть лучших сырьевых источников уже выработана, в связи с чем начинают использоваться пласты с меньшим содержанием полезного компонента и с более высоким содержанием ГСШ, что приводит к ухудшению показателей технологии [11, 12]. При этом наиболее негативное влияние на флотацию калийных солей оказывают глинисто-солевые минералы ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{MgCl}_2$ ), которые обладают большей катионной ёмкостью к солям первичных алифатических аминов, применяемых в качестве реагентов-собирающих сильвиновой флотации, что является одной из основных причин их негативного воздействия на флотацию KCl [6, 11, 13, 14]. Конкурирующая адсорбция аминов на ГСШ препятствует их адсорбции на кристаллах хлорида калия, что приводит к ухудшению или прекращению процесса флотации [12, 15].

С целью снижения содержания ГСШ в руде перед сильвиновой флотацией применяют механическое или флотационное обесшламливание калийных руд [12]. Однако такие методы не способны полностью удалить ГСШ. Оставшиеся в руде даже десятые доли процента глинисто-солевых примесей уменьшают извлечение хлорида калия во флотационный концентрат, а также вызывают необходимость дополнительного введения в процесс дорогостоящих собирав-

лей (алифатических аминов) [16, 17]. В связи с этим на стадии сильвиновой флотации до ввода в процесс реагента-собирающего рудную пульпу кондиционируют реагентами-депрессорами, которые, адсорбируясь на поверхности ГСШ, изменяют характер межфазных молекулярных взаимодействий, благодаря чему повышается селективность флотации – увеличивается выход KCl, снижается содержание ГСШ во флотационном концентрате, а также уменьшается расход реагентов-собирающих [8, 11, 12, 18, 19].

Известно большое число реагентов-депрессоров для флотации калийных руд, из которых можно отметить органические реагенты: карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), модифицированные карбамидформальдегидные смолы, модифицированный крахмал, гуаровая камедь, эпоксидная смола и др. [11, 12, 18]. Перечисленные химические соединения хорошо зарекомендовали себя в качестве реагентов, депрессирующих действие ГСШ. Однако молекулы органических депрессоров (например, КМЦ и крахмал) в растворах склонны к образованию ассоциатов и надмолекулярных структур, образование которых возрастает с повышением концентрации реагента. Кроме того, для ионогенных полимеров, в частности, КМЦ, также характерны глобулизация молекул и усиление внутримолекулярного взаимодействия [20–22]. С увеличением концентрации растворов органических депрессоров наблюдается рост вязкости раствора и одновременно ухудшение депрессирующих свойств [21]. Поэтому на производстве стремятся использовать разбавленные растворы реагентов-депрессоров (например, КМЦ < 2 %), что позволяет повысить депрессирующее действие реагентов и снизить его удельный расход. Однако применение разбавленных растворов реагентов-депрессоров ведёт к дополнительному введению воды в технологический процесс, что вызывает потери хлорида калия вследствие растворения и накопления избыточных щёлоков.

Перспективным способом решения перечисленных проблем является предварительная сонохимическая обработка высококонцентрированных растворов

органических депрессоров [23]. За счёт ультразвуковой кавитации изменяются различные физико-химические свойства коллоидной системы: вязкость, размер агрегатов молекул депрессора, электрокинетический потенциал, величина адсорбции молекул депрессора на глинисто-солевых примесях, что, в свою очередь, может повысить эффективность флотации калийных руд [24, 25]. В литературе практически отсутствуют сведения о влиянии предварительной ультразвуковой обработки депрессоров как на физико-химические свойства реагента-депрессора, так и на показатели флотации силивинитовых руд.

Цель данного исследования – установить влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров (КМЦ и крахмала) на физико-химические свойства растворов реагентов, а также на эффективность силивиновой флотации.

## 1. Материалы и методы

### 1.1. Флотационный реагент-депрессор

Для изучения влияния сонохимической обработки на реагент-депрессор силивиновой флотации использовали два вида органических депрессоров – карбоксиметилцеллюлозу (степень полимеризации 750–850) и растворимый крахмал амилодекстрин (ХЧ) (далее – крахмал), из которых готовили 4%-ный водный раствор КМЦ и 4%-ный водный раствор крахмала при температурах растворов 30 °С.

При флотационном обогащении силивинитовой руды реагент-депрессор вносили в пульпу перед добавлением эмульсии собирателя и вспенивателя на стадии силивиновой флотации. При этом удельный расход КМЦ составлял 400 г/т руды, крахмала – 160 г/т руды [11].

### 1.2. Сонохимическая обработка раствора депрессора

Сонохимическую обработку раствора депрессора проводили с помощью ультразвуковой установки, представленной на рис. 1. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовали ультразвуковой генератор с пьезоэлектрической колебательной системой с развитой излучающей поверхностью из

титанового сплава в металлическом корпусе с принудительным воздушным охлаждением модели УЗТА-0,8/22-ОМУ серии «Волна».

Установка имеет номинальную рабочую частоту  $22 \pm 1,65$  кГц, интенсивность излучения не менее  $3,5$  Вт/см<sup>2</sup>. Электронный генератор с таймером и регулятором мощности (40–100 %). При ультразвуковом воздействии 100 % мощности полная потребляемая мощность составляет 1600 В·А, активная потребляемая мощность составляет 650 Вт, при этом в среду вводится акустическая мощность около 420 Вт. Поддержание температуры раствора депрессора осуществляли с помощью термостата 3. В реактор 4 помещали раствор депрессора в количестве 500 мл и проводили его ультразвуковую обработку при различных значениях акустической мощности (от 168 до 420 Вт с шагом 84) и длительности воздействия 150 с. Для сравнения проводили контрольные опыты без сонохимической обработки при идентичных условиях.

### 1.3. Измерение размера агрегатов и дзета-потенциала раствора депрессора

Измерение размера агрегатов и дзета-потенциала депрессоров КМЦ и крахмала осуществляли с помощью лазерного прибора «Zetasizer Nano ZS» по методу динамического рассеяния света с использованием технологии неинвазивного обратного рассеяния. Значения вязкости, использованные для измерения размера агрегатов и дзета-потенциала, брали равными справочным значениям вязкости воды при заданной температуре. Индекс преломления раствора КМЦ составляет 1,515; крахмала – 1,340.

На приборе производили последовательно от 10 замеров размеров агрегатов в объёме образца, затем усредняли их. На один образец приходилось три параллельных измерения.

### 1.4. Измерение вязкостно-температурных свойств раствора депрессора

Определение динамической вязкости обработанных и не обработанных ультразвуком растворов депрессоров осуществляли при помощи вивро-вискозиметра SV-10 AND. Методика определения вязкости основана на изменении резонансной частоты коле-

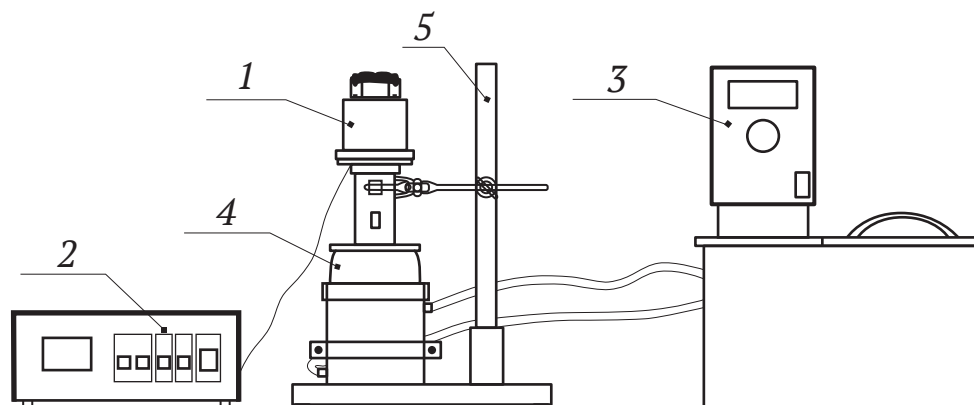


Рис. 1. Схематичное изображение лабораторной установки для сонохимической обработки реагента-депрессора: 1 – излучательный элемент; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – термостат; 4 – реактор с рубашкой; 5 – штатив



баний в жидкости различной вязкости при заданном известном значении плотности раствора. Исходная плотность 4 %-ного раствора КМЦ при температуре 30 °С составляла 1,02 кг/м<sup>3</sup>; 4 %-ного раствора крахмала при температуре 30 °С – 1,01 кг/м<sup>3</sup>.

Измерение значения температуры раствора производили термодатчиками вибровискозиметра непосредственно во время измерения вязкости. Изменение температуры растворов депрессоров осуществляли с помощью лабораторного термостата.

Предел допускаемой относительной погрешности вискозиметра равен ±3 %, повторяемость результатов измерения вязкости – не более 1 % (стандартное отклонение).

### 1.5. Эксперименты по флотации

В качестве сырья для получения флотационного хлористого калия использовали сухую сильвинитовую руду флотационной фабрики БКПРУ-3 и питание сильвиновой флотации (обесшламленную сильвинитовую руду) флотационной фабрики СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» различного химического состава, представленного в табл. 1.

Для приготовления насыщенных растворов, применявшихся при исследовании сильвиновой флотации, использовали хлорид калия марки «ХЧ» и хлорид натрия марки «ХЧ». Насыщенный раствор использовали однократно.

В качестве собирателя и вспенивателя для сильвиновой флотации использовали амины первичные (дистиллированные) гранулированные фракции C<sub>17</sub>–C<sub>20</sub> и триэтиленгликоль состава C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub> соответственно. Для приготовления раствора солянокислого амина в дистиллированную воду вносили твёрдый стеариламин (предварительно измельчённый), концентрация которого в растворе составляет 0,8 масс. %, и химически чистую соляную кислоту в количестве, на 15 % превышающем необходимое для нейтрализации стеариламина. Получившийся раствор перемешивали и термостатировали при температуре 70 °С в течение 90 мин. Далее температуру реагента снижали до рабочей, равной 60 °С. Затем в солянокислый раствор амина вносили вспениватель в количестве 30 % от массы сухого собирателя.

Эксперименты по флотации проводили с использованием лабораторной флотационной машины «ФМЛ 3/240 ФЛ». Сухую исходную руду смешивали с маточным щёлоком при соотношении фаз Ж/Т = 2,5. В полученную пульпу при перемешивании добавляли сначала обработанный или необработанный ультразвуком депрессор при заданном расходе реагента, кондицио-

нировали в течение 3 мин, далее вносили в рудную суспензию композицию состава «собиратель-вспениватель» при расходе композиции 65 г/т руды, после чего кондиционировали в течение 1 мин. Готовой рудной суспензией заполняли камеру лабораторной флотомашинки объёмом 500 мл (масса руды 194 г, объём щёлока 400 мл). Включали флотомашину со скоростью вращения импеллера 29 об/с и расходом воздуха 100 л/ч. Продолжительность процесса флотации составляла 6 мин (на один образец проводили три флотации, результаты которых усредняли). Отобранные пенный и камерный продукты фильтровали с помощью вакуумного фильтра, затем сушили до постоянной массы. После сушки проводили гравиметрический анализ полученных продуктов и определяли содержание хлористого калия во флотационном концентрате и камерном продукте с использованием пламенного фотометра ПФА 378. Анализ на содержание ГСШ во флотационном концентрате производили с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-8100P «Shimadzu» с продувкой гелием. При этом к ГСШ относили элементы Ca, Si, Al, Mg, S и Fe.

## 2. Обсуждение результатов

### 2.1. Влияние сонохимической обработки депрессора на размер агрегатов

Результаты исследований влияния режимов сонохимической обработки растворов депрессоров на размер агрегатов (дифференциальные кривые объёмного распределения агрегатов молекул КМЦ и крахмала по размеру) представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из рис. 2, с увеличением мощности сонохимического воздействия размер агрегатов молекул смещается в сторону уменьшения: от 6 нм (без ультразвуковой обработки) до 4 нм (при акустической мощности ультразвука 420 Вт). При воздействии ультразвука на концентрированные растворы КМЦ (выше 1%) происходит разрыв связей макромолекул, которые разрыхляются и приобретают более развёрнутую форму [26–28].

Как видно из анализа дифференциальных кривых объёмного распределения агрегатов молекул крахмала, представленных на рис. 3, крупные крахмальные агрегаты без сонохимического воздействия имели различный размер: около 50, 900 и 8000 нм. Больше всего наблюдались агрегаты размером около 8000 нм, на что указывает кривая объёмного распределения (кривая 1). При постепенном увеличении акустической мощности ультразвукового воздействия кривые распределения агрегатов крахмала смещались в сто-

Таблица 1

Химический состав сильвинитовых руд флотационной фабрики БКПРУ-3 и питания сильвиновой флотации флотационной фабрики СКРУ-3 ПАО «Уралкалий»

Флотационная фабрика	Массовая доля компонентов, %					Фракция
	NaCl	KCl	Н.О.*	MgCl <sub>2</sub>	CaSO <sub>4</sub>	
БКПРУ-3	66,65	26,59	4,59	0,27	1,9	(–0,900 + 0,315) мм
СКРУ-3	70,30	27,10	0,46	0,13	2,01	(–0,900 + 0,315) мм

\* Н.О. – нерастворимый осадок.

рону уменьшения размеров агрегатов, также снижалась высота пиков объёмного распределения. При этом после ультразвуковой обработки пик распределения агрегатов в области 8000 нм исчезает. При акустической мощности 420 Вт наблюдается максимальное уменьшение агрегатов до 60 нм с объёмным распределением 20 % и 600 нм с объёмным распределением менее 10 %. Таким образом, после воздействия ультразвуком максимальной мощности размер агрегатов крахмала снизился более чем в 133 раза: с 8000 нм до 60 нм.

## 2.2. Влияние сонохимической обработки депрессора на изменение электрокинетического потенциала

Результаты исследований влияния сонохимической обработки растворов реагентов-депрессоров на дзета-потенциал представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4 (кривая 1), значение дзета-потенциала раствора КМЦ постепенно смещается

в область отрицательных значений с увеличением мощности сонохимической обработки. При этом максимальное отрицательное значение дзета-потенциала наблюдается при мощности ультразвука 420 Вт и составляет  $-35,85 \pm 1,79$  мВ. Следует учесть, что КМЦ относится к группе ионогенных анионных депрессоров, имеющих в своём составе карбоксильную группу, которая придаёт данному реагенту отрицательное значение электрокинетического потенциала. Как уже было отмечено ранее (см. пп. 2.1), ультразвук разрывает внутренние связи надмолекулярных структур КМЦ, что ведёт к развёртыванию формы и увеличению анионных структур, которые смещают дзета-потенциал в область отрицательных значений [20, 24]. Поскольку сонохимическая обработка раствора КМЦ снижает дзета-потенциал депрессора, сорбция агрегатов КМЦ на поверхности положительно заряжённой частицы шлама, например гематита, должна возрастать, за счёт чего, возможно, увеличится гидрофильность этих частиц.

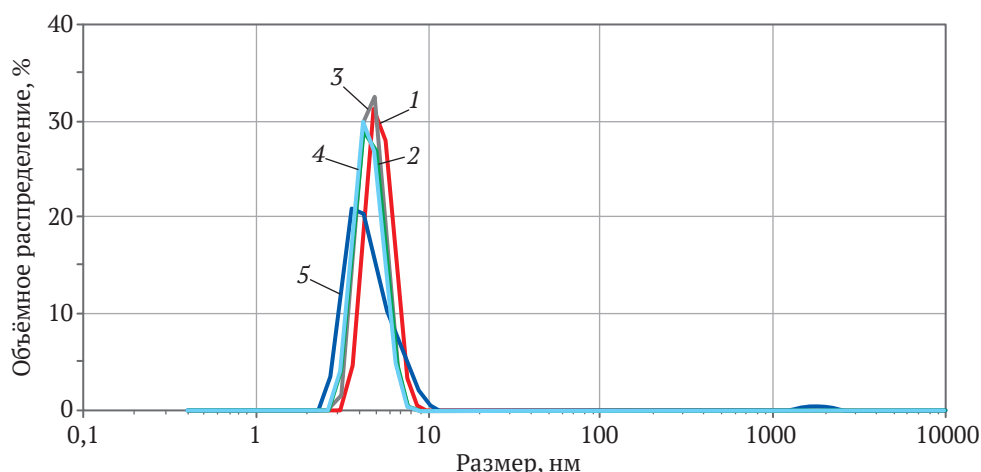


Рис. 2. Дифференциальные кривые объёмного распределения агрегатов молекул обработанного и не обработанного ультразвуком раствора КМЦ при длительности воздействия ультразвука 150 с: 1 (красный) – без ультразвуковой обработки; 2 (зелёный) – 168 Вт; 3 (серый) – 252 Вт; 4 (бирюзовый) – 336 Вт; 5 (синий) – 420 Вт

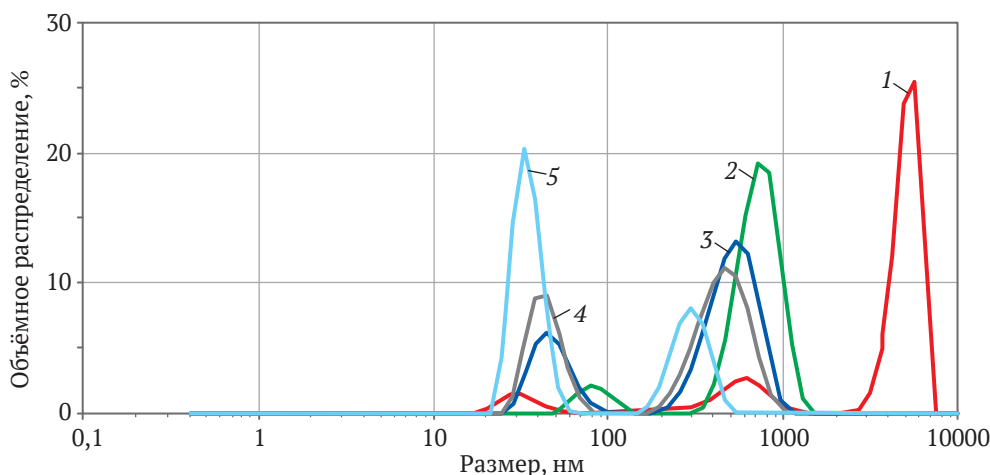
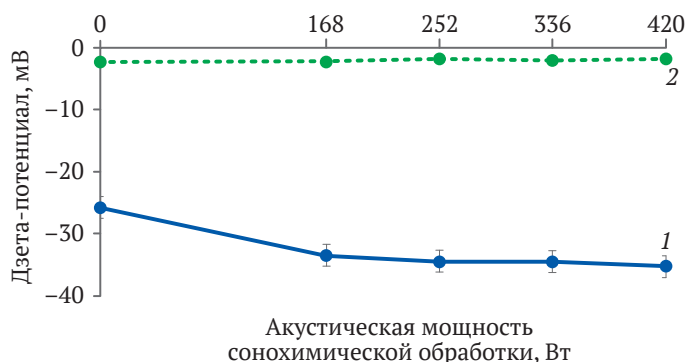


Рис. 3. Дифференциальные кривые объёмного распределения агрегатов молекул обработанного и не обработанного ультразвуком раствора крахмала при длительности воздействия ультразвука 150 с: 1 (красный) – без ультразвуковой обработки; 2 (зелёный) – 168 Вт; 3 (синий) – 252 Вт; 4 (серый) – 336 Вт; 5 (бирюзовый) – 420 Вт



**Рис. 4.** Влияние ультразвуковой обработки депрессора на изменение электрокинетического потенциала: 1 – раствор КМЦ; 2 – раствор крахмала

Из анализа рис. 4 (кривая 2) видно, что сонохимическая обработка при любой акустической мощности незначительно влияет на дзета-потенциал агрегатов крахмала. При этом электрокинетический потенциал при всех акустических мощностях сонохимической обработки близок к 0. Выявленные особенности объясняются тем, что крахмал относится к группе неионогенных органических депрессоров, не несущих заряд [29, 30]. Закрепление данного депрессора на поверхности силикатных шламов, например кварца, происходит путём образования водородных связей, где участвует большое число полярных групп каждой молекулы депрессора, при этом достигается прочная связь депрессора с минералом [31, 32]. Возможно, при воздействии ультразвука на раствор крахмала агрегаты крахмала, как и в случае с КМЦ, разрыхляются, увеличивая тем самым количество активных полярных групп, которые прочнее связываются с поверхностью минералов шлама и ведут к повышению его гидрофильности.

### 2.3. Влияние сонохимической обработки на вязкостно-температурные свойства реагента-депрессора

Влияние ультразвуковой обработки растворов КМЦ и крахмала на изменение динамической вязкости и температуры представлены в табл. 2.

Из анализа табл. 2 видно, что с увеличением акустической мощности сонохимического воздействия на реагенты динамическая вязкость растворов снижается, тогда как их температура возрастает. Максимальное снижение динамической вязкости и повышение температуры раствора КМЦ наблюдаются при сонохимической обработке мощностью 420 Вт и составляют  $5,05 \pm 0,05$  мПа·с и  $38^\circ\text{C}$  соответственно; при ультразвуковой обработке той же акустической мощности раствора крахмала вязкость снижается до  $2,66 \pm 0,03$  мПа·с, а температура раствора повышается до  $41^\circ\text{C}$ . Наибольшее воздействие сонохимическая обработка оказала на раствор крахмала, в котором при использовании максимальной акустической мощности ультразвука динамическая вязкость снизилась в 3,3 раза.

При этом, как видно из табл. 2, повышение температуры растворов реагентов без использования сонохимической обработки незначительно понижает динамическую вязкость растворов, что свидетельствует о том, что наибольший вклад в изменение вязкости оказывает ультразвуковая обработка. Следует учитывать, что при сонохимической обработке образуются, а затем схлопываются находящиеся в жидкости пузырьки газа, из-за чего локально повышаются давление и температура [21, 33, 34]. При этом локальное изменение температуры повышает температуру всего раствора, а изменение давления приводит к диспергированию агрегатов коллоидного раствора, в связи с чем вязкость среды снижается.

Таблица 2

**Влияние ультразвуковой обработки и повышения температуры растворов КМЦ и крахмала на динамическую вязкость**

Тип депрессора	Акустическая мощность, Вт	Температура раствора, °C	Динамическая вязкость раствора, мПа·с	Температура раствора, °C	
				с применением УЗ-обработки	без использования УЗ-обработки
КМЦ	0	30	$9,01 \pm 0,09$	30	$9,01 \pm 0,09$
	168	32	$7,27 \pm 0,07$	32	$8,74 \pm 0,09$
	252	35	$5,70 \pm 0,06$	35	$8,44 \pm 0,08$
	336	37	$5,18 \pm 0,05$	37	$8,24 \pm 0,08$
	420	38	$5,05 \pm 0,05$	38	$8,14 \pm 0,08$
Крахмал	0	30	$8,87 \pm 0,09$	30	$8,87 \pm 0,09$
	168	32	$4,18 \pm 0,04$	32	$8,27 \pm 0,08$
	252	35	$3,33 \pm 0,03$	35	$8,07 \pm 0,08$
	336	38	$2,92 \pm 0,03$	38	$7,78 \pm 0,08$
	420	41	$2,66 \pm 0,03$	41	$7,49 \pm 0,07$



#### 2.4. Влияние сонохимической обработки депрессора на содержание глинисто-солевого шлама в концентрате и извлечение КС1

В экспериментах по флотационному разделению компонентов сильвинита исследовали влияние предварительной сонохимической обработки реагентов-депрессоров – КМЦ и крахмала – на степень извлечения КС1 и содержание глинисто-солевого шлама в концентрате. В данных исследованиях использовали сильвинитовую руду флотационной фабрики БКПРУ-3 с высоким содержанием Н.О. (исходный состав руды представлен в табл. 1). Результаты показаны в табл. 3.

Из анализа табл. 3 видно, что использование не обработанного ультразвуком раствора реагента КМЦ снижает содержание глинисто-солевого шлама в концентрате до  $22,84 \pm 0,46$  масс. % и повышает степень извлечения хлорида калия на 1,44 % в сравнении с результатом опыта, где не применялся депрессор. При воздействии сонохимической обработки раствора КМЦ акустической мощностью 168–252 Вт наблюдается дальнейшее увеличение степени извлечения КС1 и снижение содержания глинисто-солевого шлама во флотационном концентрате (опыты 3–4). При этом наилучшие показатели (повышение степени извлечения КС1 и снижение содержания шламов) наблюдается при акустической мощности ультразвука 252 Вт. Однако дальнейшее увеличение акустической мощности сонохимической обработки до 336–420 Вт (опыты 5–6) снижает эффективность действия обработанного ультразвуком депрессора. Аналогичные закономерности наблюдаются и при использовании обработанного ультразвуком крахмала (опыты 8–11). Оптимальная акустическая мощность, при которой наблюдается максимальное значение степени извлечения КС1 и минимальное содержание шламов во флотационном концентрате, составляет 252 Вт.

Положительное влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров на эффективность флотации в первую очередь связано с воздействием ультразвуковой кавитации, которая способствует диспергированию крупных агрегатов КМЦ и крахмала (см. пп. 2.1 и 2.2), за счёт чего увеличивается количество активных полярных групп, которые, возможно, прочнее связываются с поверхностью шламов и ведут к повышению его гидрофильности, тем самым улучшая флотацию сильвина.

Снижение извлечения сильвина и увеличение содержания шлама в концентрате при использовании обработанных высокими мощностями ультразвука реагентов-депрессоров, скорее всего, связаны с процессами деструкции и окисления органических макромолекул КМЦ и крахмала, которые при этом теряют свою активность [35–37].

#### 2.5. Использование предварительной сонохимической обработки для снижения расхода реагента-депрессора

С целью подтверждения возможности снижения расхода депрессора сильвиновой флотации были проведены лабораторные эксперименты по флотации, результаты которых описаны в табл. 4. В качестве депрессора был выбран крахмал, так как по сравнению с КМЦ он эффективнее повышает степень извлечения КС1 (см. пп. 2.4). Расход реагента-депрессора снижали со 160 до 100 г/т руды с шагом 10, при этом сонохимической обработке подвергали только раствор крахмала. Критическим расходом депрессора считали тот, при котором следующий за ним расход ухудшал степень извлечения сильвина по сравнению с использованием не обработанного ультразвуком депрессора (отмечен «160\*»). В данных исследованиях использовали питание сильвиновой флотации флотационной фабрики СКРУ-3 с низким содержанием Н.О., состав которого представлен выше в табл. 1.

Таблица 3

Влияние предварительной сонохимической обработки депрессора на содержание глинисто-солевого шлама во флотационном концентрате и степень извлечения КС1

№ опыта	Депрессор	Акустическая мощность, Вт	Содержание глинисто-солевого шлама в концентрате, масс. %	Степень извлечения КС1, %
1	Без использования депрессора	Без использования сонохимической обработки	$25,70 \pm 0,51$	$23,07 \pm 0,05$
2	КМЦ	Без использования сонохимической обработки	$22,84 \pm 0,46$	$24,51 \pm 0,32$
3		168	$21,85 \pm 0,44$	$25,36 \pm 1,11$
4		252	$9,57 \pm 0,19$	$29,68 \pm 2,25$
5		336	$11,41 \pm 0,23$	$28,16 \pm 0,23$
6		420	$17,98 \pm 0,36$	$25,26 \pm 1,01$
7		Крахмал	Без использования сонохимической обработки	$12,98 \pm 0,26$
8	168		$9,14 \pm 0,18$	$28,86 \pm 1,27$
9	252		$7,02 \pm 0,14$	$30,29 \pm 0,05$
10	336		$26,19 \pm 0,52$	$20,76 \pm 0,86$
11	420		$31,85 \pm 0,64$	$19,79 \pm 2,08$



Таблица 4

**Влияние расхода обработанного ультразвуком депрессора на степень извлечения КСl при акустической мощности ультразвука 252 Вт и длительности воздействия 150 с**

Расход депрессора, г/т руды	160*	160	150	140	130	120	110	100
Степень извлечения КСl, %	55,72±0,25	62,05±2,02	60,31±0,14	59,82±0,99	59,32±1,69	57,92±3,78	54,84±0,68	52,02±0,23

\* Использование необработанного ультразвуком раствора депрессора.

Из анализа данных табл. 4 следует, что предварительная сонохимическая обработка раствора крахмала с расходом 160 г/т руды повышает степень извлечения хлорида калия по сравнению с не обработанным ультразвуком депрессором (160\*). Снижение расхода обработанного ультразвуком депрессора до 120 г/т руды уменьшает степень извлечения КСl, при этом она остаётся выше на 2,2 % по сравнению со степенью извлечения КСl в эксперименте, в котором депрессор не обрабатывался ультразвуком. Дальнейшее понижение расхода реагента до 110–100 г/т уменьшает степень извлечения КСl ниже критического (160\*) на несколько процентов.

Таким образом, используя предварительную сонохимическую обработку депрессора, можно не только повысить степень извлечения КСl в процессе сильвиновой флотации, но и снизить расход реагента. Полученные результаты целесообразно проверить в промышленных условиях.

### Заключение

Изучено влияние предварительной сонохимической обработки реагентов-депрессоров (КМЦ и крахмал) на динамическую вязкость, размер агрегатов молекул, электрокинетический потенциал растворов

этих реагентов и на эффективность сильвиновой флотации. Установлено, что сонохимическая обработка растворов КМЦ уменьшает размер агрегатов молекул с 6 до 4 нм, а крахмала – с 8000 до 60–600 нм. Выявлено, что сонохимическая обработка раствора анионного КМЦ с увеличением акустической мощности ультразвука смещает в отрицательную область дзета-потенциал, но не оказывает влияния на электрокинетический потенциал неионогенного крахмала. Выявлено, что сонохимическое воздействие на растворы КМЦ и крахмала снижает динамическую вязкость реагентов. Установлено, что предварительная сонохимическая обработка депрессоров при акустической мощности 168 и 252 Вт повышает степень извлечения КСl и снижает содержание шламов во флотационном концентрате. Кроме того, показана возможность снижения расхода обработанного ультразвуком депрессора. Таким образом, предварительная сонохимическая обработка реагентов-депрессоров позволяет улучшить показатели сильвиновой флотации за счёт диспергирования реагентов и изменения физико-химических характеристик депрессоров, что может быть использовано в технологии флотационного обогащения сильвинитовых руд после проведения опытно-промышленных испытаний.

### Список литературы

1. Huang X., Cheng C., Zhong H. et al. Flotation of sylvite from potash ore by using the Gemini surfactant as a novel flotation collector. *Minerals Engineering*. 2019;132:22–26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.055>
2. Li E., Du Z., Yuan S., Cheng F. Low temperature molecular dynamic simulation of water structure at sylvite crystal surface in saturated solution. *Minerals Engineering*. 2015;83:53–58. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.012>
3. Li E., Du Z., Li D., Cheng F. Specific ion effects of salt solutions on colloidal properties of octadecylamine hydrochloride. *Journal of Surfactants and Detergents*. 2017;20(2):483–491. <https://doi.org/10.1007/s11743-016-1923-7>
4. Wang X., Miller J.D., Cheng F., Cheng H. Potash flotation practice for carnallite resources in the Qinghai Province, PRC. *Minerals Engineering*. 2014;66–68:33–39. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.04.012>
5. Батулин Е.Н., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. и др. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира. *Современные проблемы науки и образования*. 2012;(6):613–621. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513>
6. Дихтиевская Л.В., Шломина Л.Ф., Осипова Е.О. и др. Флотационное обогащение калийных руд. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 2019;55(3):277–287. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-277-287>
7. Du H., Ozdemir O., Wang X. et al. Flotation chemistry of soluble salt minerals: from ion hydration to colloid adsorption. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2014;31(1):1–20. <https://doi.org/10.1007/BF03402344>
8. Cao Q., Du H., Miller J.D. et al. Surface chemistry features in the flotation of KCl. *Minerals Engineering*. 2010;23(5):365–373. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.11.010>





9. Chaikovskiy I.I., Korotchenkova O.V., Trapeznikov D.E. A new genetic type of leaching zone in salts of the Verkhnyaya Kama potassium salt deposit: hydrochemical, mineralogical, and structural indicators. *Lithology and Mineral Resources*. 2019;54(4):308–319. <https://doi.org/10.1134/S0024490219040023>

10. Чайковский И.И. Эпигенетическая трансформация калийных и магниевых руд Верхнекамского месторождения солей. В: *Рудогенез: материалы международной конференции*. Миасс, Екатеринбург, 2–7 февраля 2008. С. 331–338.

11. Кибанова М.С., Лановецкий С.В. Исследование влияния реагентов-депрессоров шламов на технологические показатели основной сальвинитовой флотации хлорида калия. *Молодежная наука в развитии регионов*. 2021;1:301–303.

12. Чернышев А.В., Черепанова М.В. Совершенствование стадии шламовой флотации в переработке сальвинита. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2020;(1):113–129. URL: [http://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder\\_id=9158](http://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder_id=9158)

13. Ведрова В.В., Середкина О.Р., Рахимова О.В. Способы переработки глинисто-солевых шламов в производстве калийных удобрений. *Молодежная наука в развитии регионов*. 2018;1:228–230.

14. Иванов А.Г. Дифференциация минералов галопелитов в процессе флотационного обогащения сальвинитовых руд Верхнекамского месторождения. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело*. 1999;(1):74–76. URL: <https://repository.geogyscience.ru/bitstream/handle/123456789/9106/p142.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

15. Можейко Ф.Ф., Поткина Т.Н., Шевчук В.В., Стефанович С.Ч. Интенсификация процессов обезвоживания глинисто-солевых дисперсий, модифицированных высокомолекулярными защитными реагентами-депрессорами. *Труды БГТУ №3. Химия и Технология Неорганических Веществ*. 2015;(3):35–40. URL: <https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/14999/1/mozheyko-f.-f.-potkina-t.-n.-shevchuk-v.-v.-stsefanovich-s.-ch.-intensification-of-dehydration.pdf>

16. Олиферович Д.С., Шилин Л.Ю., Батюков С.В., Пригара В.Н. Анализ и учет факторов, влияющих на технологический процесс флотации калийных руд. *Доклады Белорусского Государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2009;(2):59–66. URL: [https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/31635/1/Oliferovich\\_The.PDF](https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/31635/1/Oliferovich_The.PDF)

17. Титков С.Н., Гуркова Т.М., Пантелеева Н.Н. и др. Активация катионной флотации калийных и калийно-магниевых руд с применением новых реагентов. *Обогащение руд*. 2005;(6):37–42.

18. Кибанова М.С., Лановецкий С.В. Обзор флотационных реагентов, используемых в технологии обогащения сальвинитовых руд. *Молодежная наука в развитии регионов*. 2020;1:287–291.

19. Xuemin Q., Hongying Y., Guobao C. et al. Inhibited mechanism of carboxymethyl cellulose as a galena depressant in chalcopyrite and galena separation flotation. *Minerals Engineering*. 2020;150:106273. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106273>

20. Liu P., Gao W., Zhang X. et al. Effects of ultrasonication on the properties of maize starch/stearic acid/sodium carboxymethyl cellulose composite film. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;72:105447. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105447>

21. Iida Y., Tuziuti T., Yasui K. et al. Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2008;9(2):140–146. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.029>

22. Sujka M., Jamroz J. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour. *Food Hydrocolloids*. 2013;31(2):413–419. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.11.027>

23. Chen Y., Truong V.N.T., Bu X., Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;60:104739. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>

24. Пойлов В.З., Буров В.Е., Галлямов А.Н., Федотова О.А. Сонохимическая активация раствора солянокислого амина, используемого в качестве собирателя в технологии флотации сальвинитовых руд. *Обогащение руд*. 2021;(5):15–26. <https://doi.org/10.17580/or.2021.05.04>

25. Burov V.E., Gallyamov A.N., Fedotova O.A., Poilov V.Z. The ultrasonic treatment influence on pH solution of hydrochloric amine. In: *All-Russian Scientific and Practical Conference "Chemistry. Ecology. Urbanistics"*. 2021. Vol. 2. Pp. 224–227. URL: [https://ceu.pstu.ru/wp-content/uploads/2021/06/Himiyaekologiyaurbanistika\\_Tom-2.pdf](https://ceu.pstu.ru/wp-content/uploads/2021/06/Himiyaekologiyaurbanistika_Tom-2.pdf)

26. Liu H., Du Y.M., Kennedy J.F. Hydration energy of the 1,4-bonds of chitosan and their breakdown by ultrasonic treatment. *Carbohydrate Polymers*. 2007;68(3):598–600. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.11.004>

27. Liu P., Wang R., Kang X. et al. Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;44:215–222. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.029>

28. Savitri E., Juliastuti S.R., Handaratri A. et al. Degradation of chitosan by sonication in very-low-concentration acetic acid. *Polymer Degradation and Stability*. 2014;110:344–352. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.09.010>



29. Wu Z., Qiao D., Zhao S. et al. Nonthermal physical modification of starch: An overview of recent research into structure and property alterations. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:153–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.103>
30. Huang J., Wang Z., Fan L., Ma S. A review of wheat starch analyses: Methods, techniques, structure and function. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:130–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.149>
31. Титков С.Н. Активация действия катионных реагентов-собираателей. *Записки Горного института*. 2005;165:191–195. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8289>
32. Бочаров В.А., Хачатрян Л.С., Игнаткина В.А., Баатархуу Ж. О выборе способов разделения сульфидного медно-молибденового концентрата с использованием высокомолекулярных органических депрессоров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;(8):235–242.
33. Shen H., Guo Y., Zhao J. et al. The multi-scale structure and physicochemical properties of mung bean starch modified by ultrasound combined with plasma treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021;191:821–831. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.157>
34. Осипович А.Э., Вахрушев В.В., Казанцев А.Л. и др. Влияние ультразвуковой обработки на водную эмульсию солянокислого амина. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2014;(3):89–96. URL: [https://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder\\_id=4235](https://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder_id=4235)
35. Xu M., Xing Y., Gui X., Cao Y., Wang D., Wang L. Effect of Ultrasonic Pretreatment on Oxidized Coal Flotation. *Energy Fuels*. 2017;31(12):14367–73. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>
36. Deb Barma S., Sathish R., Baskey P.K., Biswal S.K. Chemical beneficiation of high-ash indian noncoking coal by alkali leaching under low-frequency ultrasonication. *Energy Fuels*. 2018;32(2):1309–1319. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03291>
37. Barma S.D. Ultrasonic-assisted coal beneficiation: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;50:15–35. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.016>

## References

1. Huang Z., Cheng C., Zhong H. et al. Flotation of sylvite from potash ore by using the Gemini surfactant as a novel flotation collector. *Minerals Engineering*. 2019;132:22–26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.055>
2. Li E., Du Z., Yuan S., Cheng F. Low temperature molecular dynamic simulation of water structure at sylvite crystal surface in saturated solution. *Minerals Engineering*. 2015;83:53–58. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.012>
3. Li E., Du Z., Li D., Cheng F. Specific ion effects of salt solutions on colloidal properties of octadecylamine hydrochloride. *Journal of Surfactants and Detergents*. 2017;20(2):483–491. <https://doi.org/10.1007/s11743-016-1923-7>
4. Wang X., Miller J.D., Cheng F., Cheng H. Potash flotation practice for carnallite resources in the Qinghai Province, PRC. *Minerals Engineering*. 2014;66–68:33–39. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.04.012>
5. Baturin E.N., Menshikova E.A., Blonov S.M. et al. Problems of the development of the world largest potash deposits. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2012;(6):613–621. (In Russ.) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513>
6. Dikhtievskaya L.V., Shlomina L.F., Osipova E.O. Flotation enrichment of potash ores of different mineralogical composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*. 2019;55(3):277–287. (In Russ.) <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-277-287>
7. Du H., Ozdemir O., Wang X. et al. Flotation chemistry of soluble salt minerals: from ion hydration to colloid adsorption. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2014;31(1):1–20. <https://doi.org/10.1007/BF03402344>
8. Cao Q., Du H., Miller J.D. et al. Surface chemistry features in the flotation of KCl. *Minerals Engineering*. 2010;23(5):365–373. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.11.010>
9. Chaikovskiy I.I., Korotchenkova O.V., Trapeznikov D.E. A new genetic type of leaching zone in salts of the Verkhnyaya Kama potassium salt deposit: hydrochemical, mineralogical, and structural indicators. *Lithology and Mineral Resources*. 2019;54(4):308–319. <https://doi.org/10.1134/S0024490219040023>
10. Chaikovskiy I.I. Epigenetic transformation of potassium and magnesium ores in the Verkhnyaya Kama salt deposit. In: *Rudogenez: Collection of Scientific Papers*. Miass, Ekaterinburg, 2–7 February 2008. Pp. 331–338. (In Russ.)
11. Kibanova M.S., Lanovetsky S.V. Study of the effect of slurry depressors on the performance of the rougher sylvite (potassium chloride) flotation. *Molodezhnaya Nauka v Razvitiy Regionov*. 2021;1:301–303. (In Russ.)
12. Chernyshev A.V., Cherepanova M.V. Improvement of the sludge flotation stage in the processing of sylvite. *Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology*. 2020;(1):113–129. (In Russ.) URL: [http://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder\\_id=9158](http://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder_id=9158)



13. Vedrova V.V., Seredkina O.R., Rakhimova O.V. Methods for processing of clay-salt slurry in the production of potash fertilizers. *Molodezhnaya Nauka v Razvitii Regionov*. 2018;1:228–230. (In Russ.)
14. Ivanov A.G. Differentiation of halopelite minerals during flotation processing of sylvinitic ores of the Verkhnekamskoe deposit. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology, Oil and Gas and Mining*. 1999;(1):74–76. (In Russ.) URL: <https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/9106/p142.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
15. Mozheyko F.F., Potkina T.N., Shevchuk V.V., Stsefanovich S.Ch. Intensification of dehydration of clay-salt dispersion modified by macromolecular protecting reagent-depressor. *Proceedings of BSTU. No. 3. Chemistry and Technology of Inorganic Substances*. 2015;(3):35–40. (In Russ.) URL: <https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/14999/1/mozheyko-f-f-potkina-t-n-shevchuk-v-v-stsefanovich-s.-ch.-intensification-of-dehydration.pdf>
16. Oliferovich D.S., Shilin L.Y., Batukov S.V., Prigara V.N. The analysis and the account of factors influencing technological process of flotation of potash ores. *Doklady Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Informatiki i Radioelektroniki*. 2009;(2):59–66. (In Russ.) URL: [https://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/31635/1/Oliferovich\\_The.PDF](https://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/31635/1/Oliferovich_The.PDF)
17. Titkov S.N., Gurkova T.M., Panteleeva N.N. et al. Potassium and potassium-magnesium ores cation flotation activation by means of new reagents. *Obogashchenie Rud*. 2005;(6):37–42. (In Russ.)
18. Kibanova M.S., Lanovetsky S.V. Review of flotation agents used in the process of sylvinitic ore processing. *Molodezhnaya Nauka v Razvitii Regionov*. 2020;1:287–291 (In Russ.)
19. Xuemin Q., Hongying Y., Guobao C. et al. Inhibited mechanism of carboxymethyl cellulose as a galena depressant in chalcopyrite and galena separation flotation. *Minerals Engineering*. 2020;150:106273. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106273>
20. Liu P., Gao W., Zhang X. et al. Effects of ultrasonication on the properties of maize starch/stearic acid/sodium carboxymethyl cellulose composite film. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;72:105447. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105447>
21. Iida Y., Tuziuti T., Yasui K. et al. Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2008;9(2):140–146. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.029>
22. Sujka M., Jamroz J. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour. *Food Hydrocolloids*. 2013;31(2):413–419. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.11.027>
23. Chen Y., Truong V.N.T., Bu X., Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;60:104739. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>
24. Poilov V.Z., Burov V.E., Gallyamov A.N., Fedotova O.A. Sonochemical activation of amine hydrochloric acid solution used as a collector in sylvinitic ore flotation. *Obogashchenie Rud*. 2021;(5):15–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2021.05.04>
25. Burov V.E., Gallyamov A.N., Fedotova O.A., Poilov V.Z. The ultrasonic treatment influence on pH solution of hydrochloric amine. In: *All-Russian Scientific and Practical Conference "Chemistry. Ecology. Urbanistics"*. 2021. Vol. 2. Pp. 224–227. URL: [https://ce.u.pstu.ru/wp-content/uploads/2021/06/Himiyaekologiyaurbanistika\\_Tom-2.pdf](https://ce.u.pstu.ru/wp-content/uploads/2021/06/Himiyaekologiyaurbanistika_Tom-2.pdf)
26. Liu H., Du Y.M., Kennedy J.F. Hydration energy of the 1,4-bonds of chitosan and their breakdown by ultrasonic treatment. *Carbohydrate Polymers*. 2007;68(3):598–600. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.11.004>
27. Liu P., Wang R., Kang X. et al. Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;44:215–222. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.029>
28. Savitri E., Juliastuti S.R., Handaratri A. et al. Degradation of chitosan by sonication in very-low-concentration acetic acid. *Polymer Degradation and Stability*. 2014;110:344–352. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.09.010>
29. Wu Z., Qiao D., Zhao S. et al. Nonthermal physical modification of starch: An overview of recent research into structure and property alterations. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:153–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.103>
30. Huang J., Wang Z., Fan L., Ma S. A review of wheat starch analyses: Methods, techniques, structure and function. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;203:130–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.149>
31. Titkov S.N. Activation of the action of cationic collecting reagents. *Journal of Mining Institute*. 2005;165:191–195. (In Russ.) URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8289>
32. Bocharov V.A., Khachatryan L.S., Ignatkina V.A., Baatarhuu J. On the selection of copper-molybdenum sulfide concentrate division methods with the use of high molecular weight organic depressors. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(8):235–242. (In Russ.)



33. Shen H., Guo Y., Zhao J. et al. The multi-scale structure and physicochemical properties of mung bean starch modified by ultrasound combined with plasma treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021;191:821–831. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.157>
34. Osipovich A.E., Vakhrushev V.V., Kazantsev A.L. et al. Ultrasonic treatment influence on aqueous emulsion of amine hydrochloride. *Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology*. 2014;(3):89–96. (In Russ.) URL: [https://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder\\_id=4235](https://vestnik.pstu.ru/biohim/archives/?id=&folder_id=4235)
35. Xu M., Xing Y., Gui X., Cao Y., Wang D., Wang L. Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation. *Energy Fuels*. 2017;31(12):14367–73. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>
36. Deb Barma S., Sathish R., Baskey P.K., Biswal S.K. Chemical beneficiation of high-ash indian noncoking coal by alkali leaching under low-frequency ultrasonication. *Energy Fuels*. 2018;32(2):1309–1319. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03291>
37. Barma S.D. Ultrasonic-assisted coal beneficiation: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;50:15–35. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.016>

### Информация об авторах

**Владимир Евгеньевич Буров** – аспирант кафедры «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-0369-0492](https://orcid.org/0000-0003-0369-0492), Scopus ID [57370843500](https://scopus.com/authorid/57370843500), SPIN-код [6897-4317](https://sp.inet.ru/author/6897-4317); e-mail [vladimire.burov@gmail.com](mailto:vladimire.burov@gmail.com)

**Владимир Зотович Пойлов** – доктор технических наук, профессор кафедры «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [10043355200](https://scopus.com/authorid/10043355200); e-mail [vladimirpoilov@mail.ru](mailto:vladimirpoilov@mail.ru)

**Чжицян Хуан** – PhD, профессор, Школа ресурсного и экологического инжиниринга, Университет науки и технологии Цзянси, г.о. Ганьчжоу, Китай; ORCID [0000-0002-5562-8407](https://orcid.org/0000-0002-5562-8407), Scopus ID [35205081500](https://scopus.com/authorid/35205081500); e-mail [zhiqiang@jxust.edu.cn](mailto:zhiqiang@jxust.edu.cn)

**Алексей Владимирович Чернышев** – аспирант кафедры «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail [AlexCher-1997@yandex.ru](mailto:AlexCher-1997@yandex.ru)

**Константин Геннадьевич Кузьминых** – старший преподаватель кафедры «Химические технологии», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [57211144529](https://scopus.com/authorid/57211144529); e-mail [kgkuz@mail.ru](mailto:kgkuz@mail.ru)

### Information about the authors

**Vladimir E. Burov** – PhD-Student, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0003-0369-0492](https://orcid.org/0000-0003-0369-0492), Scopus ID [57370843500](https://scopus.com/authorid/57370843500), SPIN-code [6897-4317](https://sp.inet.ru/author/6897-4317); e-mail [vladimire.burov@gmail.com](mailto:vladimire.burov@gmail.com)

**Vladimir Z. Poilov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; Scopus ID [10043355200](https://scopus.com/authorid/10043355200); e-mail [vladimirpoilov@mail.ru](mailto:vladimirpoilov@mail.ru)

**Zhiqiang Huang** – PhD, Professor, School of Resource and Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, China; ORCID [0000-0002-5562-8407](https://orcid.org/0000-0002-5562-8407), Scopus ID [35205081500](https://scopus.com/authorid/35205081500); e-mail [zhiqiang@jxust.edu.cn](mailto:zhiqiang@jxust.edu.cn)

**Alexey V. Chernyshev** – PhD-Student, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; e-mail [AlexCher-1997@yandex.ru](mailto:AlexCher-1997@yandex.ru)

**Konstantin G. Kuzminykh** – Senior Lecturer, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; Scopus ID [57211144529](https://scopus.com/authorid/57211144529); e-mail [kgkuz@mail.ru](mailto:kgkuz@mail.ru)

Поступила в редакцию	09.08.2022	Received	09.08.2022
Поступила после рецензирования	19.09.2022	Revised	19.09.2022
Принята к публикации	23.09.2022	Accepted	23.09.2022