

DOI: 10.15593/2224-9400/2024.4.08

Научная статья

УДК 622.7

А.В. Чернышев, В.З. Пойлов, Е.С. ШестаковаПермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Российская Федерация**А.Е. Леснов**Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Российская Федерация
Пермский государственный аграрно-технологический университет,
Пермь, Российская Федерация**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ
НА ФЛОКУЛИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ РАСТВОРА
ПОЛИАКРИЛАМИДА**

Химический состав сильвинитовых руд представлен в основном хлоридами калия (сильвин) и натрия (галит) и глинисто-солевым шламом, в состав которого входят алюмосиликаты, сульфаты и карбонаты кальция и магния. Присутствие шлама в руде снижает степень извлечения сильвина в процессе обогащения. В связи с этим во флотационной технологии переработки сильвинитовых руд важную роль играет процесс обесшламливания руды с использованием флокулянтов – реагентов, отвечающих за флокуляцию мелких частиц шлама, средний размер которых не превышает 100 мкм. Правильный подбор флокулянта должен обеспечивать высокую флокулирующую способность нерастворимого в воде остатка во время флотации и в процессе сгущения шламового продукта, полученного при флотационном обесшламливании.

В работе с целью исследования возможности повышения активности действия флокулянта исследована предварительная низкочастотная ультразвуковая (УЗ) обработка раствора флокулянта на основе полиакриламида (ПАА). Установлено, что с повышением удельной акустической мощности УЗ-обработки происходит снижение размера мицелл ПАА и вязкости раствора, повышение флокулирующей способности полиакриламида и степени осветления (очистки) маточного раствора. Наблюдается также повышение степени извлечения глинисто-солевого шлама из руды на 3 % при флотационном обесшламливании.

Данные результаты могут найти применение для повышения эффективности как флотационного обесшламливания, так и сгущения и осветления оборотных щелоков от примесей нерастворимых веществ в условиях работы флотационных фабрик.

Ключевые слова: флокулянт, ультразвуковая обработка, флокулирующая способность, полиакриламид, глинисто-солевой шлам, сильвинитовая руда.

A.V. Chernyshev, V.Z. Poilov, E.S. Shestakova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

A.E. Lesnov

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm State Agro-Technological University, Perm, Russian Federation

EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT ON THE FLOCCULATING CAPACITY OF POLYACRYLAMIDE SOLUTION

The chemical composition of sylvinite ores is mainly represented by potassium (sylvin) and sodium (halite) chlorides and clay-salt sludge, which includes aluminosilicates, sulfates and carbonates of calcium and magnesium. The presence of sludge in the ore reduces the degree of sylvinite extraction during enrichment. In this regard, in the flotation technology of sylvinite ore processing, an important role is played by the process of ore desliming using flocculants - reagents responsible for the flocculation of small particles of sludge, the average size of which does not exceed 100 microns. The correct selection of flocculant should ensure high flocculating capacity of the water-insoluble residue during flotation and in the process of thickening the sludge product obtained during flotation desliming. In this work, in order to study the possibility of increasing the activity of the flocculant, preliminary low-frequency ultrasonic (US) treatment of a flocculant solution based on polyacrylamide (PAA) was investigated. It was found that with an increase in the specific acoustic power of the ultrasonic treatment, the size of PAA micelles and the viscosity of the solution decrease, the flocculating capacity of polyacrylamide and the degree of clarification (purification) of the mother liquor increase. An increase in the degree of extraction of clay-salt sludge from ore by 3% during flotation desliming is also observed. These results can be used to increase the efficiency of both flotation desliming and thickening and clarification of recycled liquors from impurities of insoluble substances under the operating conditions of flotation plants.

Keywords: flocculant, ultrasonic treatment, flocculating ability, polyacrylamide, clay-salt sludge, sylvinite ore.

Введение. Россия – один из мировых лидеров по производству и экспорту калийных удобрений. Как к любому удобрению, к хлористому калию предъявляются особые требования по соответствию качества готового продукта утвержденным стандартам. Состав сильвинитовой руды, из которой получают хлористый калий, представлен хлоридами калия и натрия и глинисто-солевым шламом (ГСШ). ГСШ включает в себя алюмосиликаты, карбонаты и сульфаты кальция и магния, оксид железа (III) в разном процентном соотношении в зависимости от различных месторождений [1]. Обладая высокой удельной поверхностью, шламы поглощают значительную часть катионного собирателя, при-

меняемого при флотации сильвина (KCl), следовательно, эффективность их удаления из руды и переработки в дальнейших технологических процессах является одной из главных задач работы флотационных обогатительных фабрик.

При флотационном обесшламливании руды особое внимание уделяется подбору высокоэффективных и недорогих флотореагентов – собиратель и флокулянт. Флокулянт – реагент, отвечающий за флокуляцию мелких частиц шлама, средний размер которых не превышает 100 мкм. Водные растворы полимеров акриламида находят широкое применение в различных отраслях промышленности в качестве ускорителя процессов флокуляции и седиментации. В работе [2] при описании механизма процесса флокуляции глинистых шламов с использованием полиакриламида (ПАА) показан механизм адсорбции молекул ПАА на поверхности глинистых частиц за счет электростатического взаимодействия и образования водородных связей. Обладая нитеподобными молекулами, ПАА закрепляется своими концами на частицах нерастворимого остатка. Молекулы флокулянта ввиду большой молекулярной массы и повышенной вязкости раствора обладают способностью к сворачиванию, в результате чего происходит притяжение закрепившихся отдельных частиц с образованием крупных флокулов, сопровождающееся ускорением процесса седиментации.

Флокулянт находит свое применение в процессах обогащения сильвинита как при флотации шламов, так и при сгущении пенного продукта шламовой флотации. Подача флокулянта в процесс сгущения позволяет повысить скорость осаждения шламов в сгустителе и степень осветления оборотных маточных растворов. При высоких технологических нагрузках фабрики по обогащаемой руде повышение скорости флокуляции и седиментации исключает необходимость ввода дополнительного оборудования для сгущения больших объемов глинисто-солевых суспензий.

Среди перспективных способов повышения активности действия флотореагентов можно выделить их предварительную ультразвуковую (УЗ) обработку [3–9]. При действии ультразвуковой кавитации происходит изменение физико-химических характеристик, среди которых наблюдаются: диспергирование мицелл вещества, изменение вязкости и поверхностного натяжения раствора, величины показателя адсорбции реагента на поверхности минерала.

В работах [10, 11] исследовано влияние микроволнового и ультразвукового воздействий на флокулянт на основе полиакриламида.

Эти работы были направлены на повышение вязкости и молекулярной массы флокулянта, обусловленные превращением глобулярной формы макромолекул в фибриллярную за счет взаимодействия полимерных цепей и модификаторов в результате специфического воздействия ультразвука и микроволнового облучения.

Целью данной работы является определение влияния предварительной низкочастотной ультразвуковой обработки водного раствора полиакриламида на изменение флокулирующей способности глинисто-солевых шламов сильвинитовых руд.

Материалы и методы исследования. В качестве исследуемого флокулянта использовали 0,1 % водный раствор анионного полиакриламида торговой марки UTS-219 с молекулярной массой более 14 млн.

Ультразвуковую обработку флокулянта проводили при помощи УЗ-установки, представленной на рис. 1.

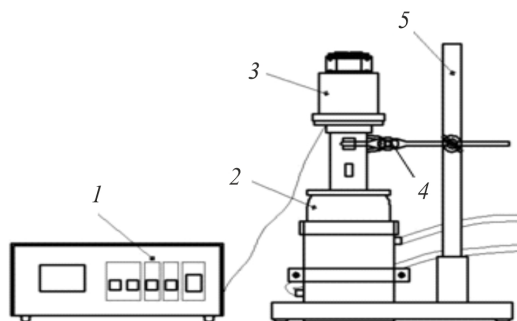


Рис. 1. Лабораторная установка для ультразвуковой обработки раствора:
1 – УЗ-генератор; 2 – лабораторный стакан; 3 – УЗ-излучающая поверхность;
4 – держатель; 5 – лабораторный штатив

В качестве источника ультразвуковых колебаний использовали ультразвуковой генератор модели УЗТА-0,8/22-ОМУ серии «Волна». УЗ-излучающая поверхность из титанового сплава в металлическом корпусе с принудительным воздушным охлаждением.

Для изучения влияния ультразвуковой обработки на физико-химические свойства реагента-флокулянта применяли различные значения акустической мощности (от 0,34 до 0,85 Вт/см³ с шагом 0,17 Вт/см³) и длительности излучения 150 с. Для сравнения проводили контрольные опыты без УЗ-обработки.

Частота ультразвука 22 кГц была выбрана исходя из предпосылок, согласно которым при использовании низкочастотного ультразвука проявляется переходный вид кавитации, способствующий диспер-

гированию мицелл, посредством схлопывания переходных кавитационных пузырьков.

Измерение размера мицелл собирателя проводили с применением анализатора размеров частиц и молекул «Zetasizer Nano ZS» компании «Malvern Panalytical». Принцип измерения размеров мицелл основан на измерении и анализе возникающих из-за неоднородности среды флуктуаций интенсивности рассеянного света в объеме, содержащем коллоидные частицы в растворе, в разные моменты времени. На основании полученных результатов построены дифференциальные кривые объемного распределения агрегатов молекул полиакриламида.

Определение динамической вязкости осуществляли при помощи вибровискозиметра SV-10 японской фирмы AND. Методика определения вязкости основана на изменении резонансной частоты колебаний в жидкости различной вязкости при заданном известном значении плотности раствора. Измерение значения температуры раствора осуществляли термодатчиками вибровискозиметра непосредственно во время измерения вязкости.

Для проведения шламовой флотации использовали сильвинитовую руду СОФ СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» фракции $-1,250$ мм, химический состав которой приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сильвинитовой руды СОФ СКРУ-3
ПАО «Уралкалий» фракции $-1,250$ мм

Компонент	Массовая доля, %				
	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgCl ₂	H ₂ O
Исходная руда СОФ СКРУ-3 ПАО «Уралкалий»	28,04	68,80	1,51	0,13	1,52

Оценку флокулирующей способности проводили по степени осветления раствора в системе эвтонический раствор – глинисто-солевой шлам с применением фотоэлектрического концентрационного колориметра КФК-2, предназначенного для измерения в отдельных участках диапазона длин волн 315-980 нм, выделяемых светофильтрами, коэффициентов пропускания и оптической плотности жидкостных растворов и твердых тел. В качестве раствора была взята система глинисто-солевой шлам – солевой раствор. Для приготовления суспензии использовали навеску глинистого шлама массой 3 г с содержанием фракций $-0,056 - 65$ % и $-0,098+0,056 - 35$ % и 200 мл профильтрованного ма-

точного раствора. Приготовление осуществляли путем внесения в маточный раствор при перемешивании навески шлама, добавления 1 мл раствора ПАА (обработанного или необработанного ультразвуком).

Эксперименты по флотации шламов проводили с использованием лабораторной флотационной машины ФМЛ 1 (237 ФЛ), моделирующей условия промышленной флотации сильвинитовой руды в режиме с соотношением фаз в пульпе Ж:Т = 2,5. Расход флотореагентов: флокулянт с расходной нормой 20,5 г/т руды; собиратель шламов (2,0 % водный раствор оксиэтилированных фенолов) – 51,5 г/т руды. Продолжительность шламовой флотации составляла 6 мин.

Результаты и их обсуждение. При действии низкочастотного ультразвукового воздействия наблюдается эффект переходной кавитации, при котором мицеллы и агрегаты веществ склонны к диспергированию [4–7]. Для подтверждения такого влияния ультразвука на изменение физико-химических свойств полиакриламида была проведена УЗ-обработка водного раствора ПАА при разных значениях удельной акустической мощности. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние мощности ультразвуковой обработки раствора ПАА
на физико-химические свойства раствора полиакриламида
при длительности УЗ-обработки 150 с

Удельная акустическая мощность, Вт/см ³	Температура, °С	Динамическая вязкость раствора, мПа·с	Размер флокул ПАА, нм
0	21,4	7,915 ± 0,373	1,489 ± 0,100
0,34	24,4	7,585 ± 0,164	1029,388 ± 20,771
0,51	28,3	6,985 ± 0,080	767,692 ± 14,734
0,68	29,1	5,527 ± 0,095	689,329 ± 12,473
0,85	30,1	5,169 ± 0,005	652,986 ± 10,364

Из анализа данных табл. 2 следует, что выделение энергии в результате УЗ-схлопывания кавитационных пузырьков приводит к повышению температуры раствора ПАА. Так, максимальное повышение температуры по сравнению с контрольным измерением (без УЗ-воздействия) составило 9,7 °С. Закономерно наблюдалось и снижение динамической вязкости раствора с повышением мощности УЗ-обработки. Аналогичные результаты по снижению вязкости при действии ультразвука были получены в работе [12]. Особенно резкое снижение вязкости наблюдается при высоких мощностях УЗ-обработки.

При оценке влияния УЗ-обработки ПАА на размер флокул обнаружено снижение размера флокул большого размера и увеличение (за счет агрегации) размера флокул малого размера с повышением акустической мощности. Для наглядного подтверждения на рис. 2 приведены дифференциальные кривые объемного распределения флокул по размеру. Отчетливо проявляется наличие полидисперсности флокул. Так, при контрольных измерениях размеров флокул без УЗ-воздействия наблюдается экстремум на дифференциальной кривой объемного распределения флокул в области 2 нм, а другой максимум размера флокул находится за пределами измерений 10 000 нм. С увеличением мощности УЗ-обработки ПАА наблюдается сдвиг дифференциальных кривых объемного распределения крупных флокул в область меньших размеров, а флокул малого размера – в область крупных размеров. УЗ-схлопывание кавитационных пузырьков приводит к разрушению межмолекулярных водородных связей, что приводит к частичному разрушению агрегатов флокул [13].

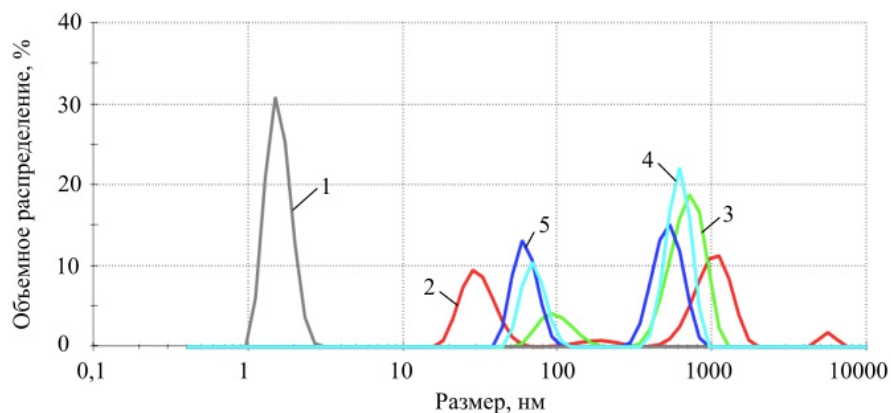


Рис. 2. Дифференциальные кривые объемного распределения флокул неактивированного и активированного ультразвуком раствора ПАА при длительности воздействия ультразвука 150 с: 1 (серый) – без ультразвуковой обработки; 2 (красный) – 0,34 Вт/см³; 3 (зеленый) – 0,51 Вт/см³; 4 (бирюзовый) – 0,68 Вт/см³; 5 (синий) – 0,85 Вт/см³

Для оценки изменения флокулирующей способности полиакриламида после действия ультразвука было введено понятие степени очистки раствора (СО), рассчитываемой по формуле

$$CO = \frac{D_0 - D}{D_0},$$

где D_0 – оптическая плотность суспензии глинисто-солевого шлама с введением флокулянта, необработанного ультразвуком; D – оптическая плотность суспензии глинисто-солевого шлама с введением флокулянта, обработанного ультразвуком различной мощности.

В табл. 3 представлены полученные через определенные отрезки времени значения степени очистки маточного раствора в системе «маточный раствор – глинисто-солевой шлам» после введения флокулянта. Периодическое изменение знака степени очистки при минимальной мощности 0,34 Вт/см³ указывает на близость значений к контрольному измерению (без УЗ-обработки). Увеличение флокулирующей способности происходит при повышении мощности УЗ-обработки, начиная с 0,68 Вт/см³.

Таблица 3

Влияние ультразвуковой обработки ПАА на степень осветления раствора от нерастворимых частиц при длительности УЗ-обработки 150 с

Время измерения, с	Удельная акустическая мощность УЗО, Вт/см ³			
	0,34	0,51	0,68	0,85
0	0,058	0,058	0,050	0,042
60	0,032	-0,019	0,019	0,057
120	-0,018	0,039	0,054	0,069
180	-0,026	0,049	0,063	0,076
300	-0,005	0,077	0,089	0,102
600	0,056	0,125	0,137	0,149

Следует отметить, что при мощности УЗ-обработки 0,68 Вт/см³ и выше наблюдается прямо пропорциональная зависимость между мощностью ультразвуковой активации ПАА и его флокулирующим действием. Это объясняется тем, что УЗ-деструкция способствует снижению компактности молекул ПАА в связи с раскрытием макромолекул флокулянта и, как следствие, способствует повышению вероятности связывания частиц нерастворимого остатка в соответствии с мостичным механизмом флокуляции [14]. Полиакриламидные соединения отличаются высокой гибкостью их углеводородных цепочек, что определяет возможность различной ориентации макромолекул в растворе. В обычных условиях мицелла ПАА часто обращена полярными группами внутрь молекулы, глобулизована. Такое расположение соответствует неполному закреплению функциональных групп на поверхности глинистых частиц и их агрегатов. Ультразвуковое воздействие на растворы ПАА способствует переходу глобулизованных макромолекул

флокулянта в развернутые формы и частично разрушает надмолекулярные ассоциированные образования, способствуя более полному закреплению функциональных групп на поверхности глинистых частиц, в результате чего увеличивается флокулирующая способность, а также повышает диспергацию реагента в слабвязких жидких средах [15].

Увеличение флокулирующего эффекта может способствовать и более полному извлечению глинисто-солевого шлама (Н.О.) в пенный продукт на стадии шламовой флотации. Для подтверждения данного предположения была проведена шламовая флотация сильвинитовой руды. Результаты представлены на рис. 3.

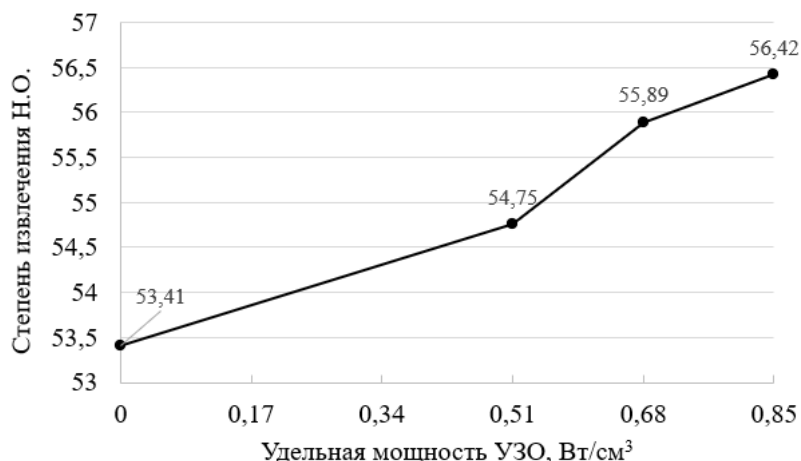


Рис. 3. Влияние ультразвуковой обработки раствора флокулянта на степень извлечения Н.О.

Полученные результаты показывают, что ультразвуковая обработка флокулянта повышает активность действия реагента, в первую очередь за счет повышения флокулирующей способности. С повышением мощности УЗ-обработки возрастает степень извлечения нерастворимого остатка, максимальный прирост по сравнению с контрольным экспериментом без УЗ-обработки составил 3,01 %.

Выводы. В ходе проведенной работы определено, что ультразвуковая обработка флокулянта ПАА способствует снижению размера крупных агрегатов, вязкости раствора – параметров, оказывающих влияние на механизм адсорбции полиакриламида на поверхности частиц шлама за счет изменения компактности и подвижности макромолекул ПАА.

Установлено, что ультразвуковая активация приводит к повышению флокулирующей способности и степени очистки маточного раствора

в системе «маточный раствор – глинисто-солевой шлам». Также отмечено повышение степени извлечения нерастворимого остатка сильвинитовой руды в связи с повышенной флокуляцией после введения раствора полиакриламида, обработанного ультразвуком, на величину до 3,01 %.

Данные результаты могут найти применение для повышения эффективности как флотационного обесшламливания, так и сгущения шламов и осветления оборотных щелоков в условиях работы флотационных фабрик.

Список литературы

1. Титков, С.Н. Обогащение калийных руд / С.Н. Титков, А.И. Мамедов, Е.И. Соловьев. – М.: Недра, 1982. – 216 с.
2. Печковский, В.В. Технология калийных удобрений / В.В. Печковский, Х.М. Александрович, Г.Ф. Пинаев. – Минск: Вышэйшая школа, 1968. – 262 с.
3. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation / Y. Chen, N.T. Truong, X. Bu, G. Xie // J. Ultrason. Sonochem. – 2020. – Vol. 60. – P. 104739.
4. Влияние ультразвуковой обработки на физико-химические характеристики флотационных собирателей, применяемых при обесшламливании сильвинитовых руд / А.В. Чернышев, В.З. Пойлов, В.Е. Буров, К.Г. Кузьминых // Обогащение руд. – 2023. – № 5. – С. 25–30.
5. Сонохимическая активация раствора солянокислого амина, используемого в качестве собирателя в технологии флотации сильвинитовых руд / В.З. Пойлов, В.Е. Буров, А.Н. Галлямов, О.А. Федотова // Обогащение руд. – 2021. – № 5. – С. 20–26.
6. Влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров шламов на эффективность сильвиновой флотации / В.Е. Буров, В.З. Пойлов, Ч. Хуан, А.В. Чернышев, К.Г. Кузьминых // Горные науки и технологии. – 2022. – Т. 7, № 4. – С. 298–309.
7. Осипова, Е.О. Повышение эффективности собирательного действия аминов при использовании комбинации вспенивателей / Е.О. Осипова, В.В. Шевчук // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2022. – Т. 58, № 1. – С. 45–52.
8. Deb Barma, S. Ultrasonic-assisted coal beneficiation: a review / S. Deb Barma // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – Vol. 50. – P. 15–35.
9. Косвинцев, О.К. Исследование влияния ультразвукового воздействия на стадии шламовой флотации сильвинитовой руды / О.К. Косвинцев, С.А. Миронова, С.В. Лановецкий // ИВД. – 2015. – № 2-2.
10. Способ модификации флокулянта: пат. 2529229 Рос. Федерация / Шевченко Т.В., Устинова Ю.В., Токмакова И.О., Кучер Н.А. – № 2013109638/05; заявл. 04.03.2013; опубл. 27.09.2014.
11. Влияние волнового облучения на процесс модификации и физико-химические свойства модифицированных флокулянтов / Т.В. Шевченко,

А.Ю. Темиров, Е.В. Ульрих, Л.А. Сенчукова, Е.В. Кучкина // Химическая промышленность сегодня. – 2008. – № 5. – С. 11–15.

12. Chernyshev, A.V. Effect of ultrasound on a viscosity-temperature properties of collector for sludge flotation / A.V. Chernyshev, V.E. Burov, V.Z. Poilov // Химия. Экология. Урбанистика: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием). – Пермь, 2022. – Т. 2. – С. 195–198.

13. Tuan, Q. Nguyen. Kinetics of ultrasonic and transient elongational flow degradation: a comparative study / Tuan Q. Nguyen, Qi Z. Liang, Henning-H. Kausch // Ultrasonics Sonochemistry. – 1997. – Vol. 38.

14. Шачнева, Е.Ю. Теория Ла Мера – основа флокуляционной очистки сточных вод промышленных предприятий / Е.Ю. Шачнева // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2017. – № 8 (116). – С. 30–33.

15. Воронова, О.В. Использование ультразвуковой обработки оксигидрильных собирателей с целью повышения их активности и селективных свойств / О.В. Воронова, Л.А. Киенко // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XV Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.: в 3 ч. – Ч. 3. / Забайкал. гос. ун-т. – Чита, 2015. – С. 116–120.

References

1. Titkov S.N., Mammadov A.I., Solovyov E.I. Obogashhenie kalijnyh rud [Enrichment of potash ores]. M, Nedra, 1982, 216 p.

2. Pechkovsky V.V., Alexandrovich H.M., Pinaev G.F. Tehnologija kalijnyh udobrenij [Technology of potash fertilizers]. Minsk, Vyshhejschaja shkola, 1968, 262 p.

3. Chen Y., Truong N.T., Bu X., Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. J. Ultrason. Sonochem, 2020, vol. 60, pp. 104739.

4. Chernyshev A.V., Poilov V.Z., Burov V.E., Kuzminykh K.G. Vlijanie ul'trazvukovoj obrabotki na fiziko-himicheskie harakteristiki flotacionnyh sobiratelej, primenjaemyh pri obesshlamlivanii sil'vinitovyh rud [The effect of ultrasonic treatment on the physico-chemical characteristics of flotation collectors used in the desalination of silvinit ores]. Obogashhenie rud, 2023, no. 5, pp. 25-30.

5. Poilov V.Z., Burov V.E., Gallyamov A.N., Fedotova O.A. Sonohimicheskaja aktivacija rastvora soljanokislogo amina, ispol'zuemogo v kachestve sobiratelja v tehnologii flotacii sil'vinitovyh rud [Sonochemical activation of a solution of hydrochloric acid amine used as a collector in the technology of flotation of silvinit ores // Ore enrichment]. Obogashhenie rud, 2021, no. 5, pp. 20-26.

6. Burov V.E., Poilov V.Z., Huang Ch., Chernyshev A.V., Kuzminykh K.G. Vlijanie predvaritel'noj sonohimicheskoy obrabotki depressorov shlamov na jeffektivnost' sil'vinovoj flotacii [Influence of preliminary sonochemical treatment of sludge depressors on the effectiveness of sylvin flotation]. Gornye nauki i tehnologii, 2022, Vol. 7, no. 4, pp. 298-309.

7. Osipova E. O., Shevchuk V. V. Povyshenie jeffektivnosti sobiratel'nogo dejstviya aminov pri ispol'zovanii kombinacii vspenivatelej [Improving the efficiency of the collective action of amines when using a combination of foamers]. Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. him. Navuk, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 45-52.

8. Deb Barma S. Ultrasonic-assisted coal benefit: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 50, pp. 15–35.
9. Kosvintsev O.K., Mironova S.A., Lanovetsky S.V. Issledovanie vlijanija ul'trazvukovogo vozdejstviya na stadii shlamovoj flotacii sil'vinitovoj rudy [Investigation of the effect of ultrasonic exposure at the stage of sludge flotation of silvinite ore]. *IVD*, 2015, no. 2-2.
10. Shevchenko T.V., Ustinova Yu.V., Tokmakova I.O., Kucher. N.A. Sposob modifikacii flokuljanta [Method of modification of the flocculant]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2013109638/05 (2013).
11. Shevchenko T.V., Temirev A.Yu., Ulrich E.V., Senchurova L.A., Kuchkina E.V. Vlijanie volnovogo obluchenija na process modifikacii i fiziko-himicheskie svojstva modifitsirovannyh flokuljantov. *Himicheskaja promyshlennost' segodnja*, 2008, no. 5, pp. 11-15.
12. Chernyshev A.V., Burov V.E., Poilov V.Z. Effect of ultrasound on a viscosity-temperature properties of collector for sludge flotation. *Himija. Jekologija. Urbanistika: materialy vsrossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem)*. Perm, April 28-29, 2022, vol. 2, pp. 195-198.
13. Tuan Q. Nguyen, Qi Z. Liang, Henning-H. Kausch. Kinetics of ultrasonic and transient elongational flow degradation: a comparative study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1997, vol. 38.
14. Shachneva E.Yu. Teorija La Mera – osnova flokuljacionnoj ochistki stochnyh vod promyshlennyh predpriyatij [The theory of La Mer – the basis of flocculation wastewater treatment of industrial enterprises]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2017, №8.
15. Voronova O.V., Kienko L.A. Ispol'zovanie ul'trazvukovoj obrabotki oksigidril'nyh sobiratelej s cel'ju povyshenija ih aktivnosti i selektivnyh svojstv [The use of ultrasonic processing of oxyhydriyl collectors in order to increase their activity and selective properties]. *Kulaginskie chtenija: tehnika i tehnologii proizvodstvennyh processov. XV Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija*. November 30 – December 02, Chita, 2015, *Zabajkal'skij gosudarstvennyj universitet*, 2015, vol.3, pp. 116-120.

Об авторах

Чернышев Алексей Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Химические технологии» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: alexcher-1997@yandex.ru).

Пойлов Владимир Зотович (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Химические технологии» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

Шестакова Елизавета Сергеевна (Пермь, Российская Федерация) – магистрант кафедры «Химические технологии» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: shestakovalisa@gmail.com).

Леснов Андрей Евгеньевич (Пермь, Российская Федерация) – доктор химических наук, профессор кафедры охраны окружающей среды Пермского национального исследовательского политехнического университета, профессор кафедры экологии и химических технологий Пермского государственного аграрно-технологического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: lesnov_ae@mail.ru).

About the authors

Chernyshev Alexey V. (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: alexcher-1997@yandex.ru).

Poilov Vladimir Z. (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technology, Perm National Research University Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

Shestakova Elizaveta S. (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: shestakovalisa@gmail.com).

Andrey E. Lesnov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Environmental Protection (Perm National Research Polytechnic University), Professor of the Department of Ecology and Chemical Technologies of the Perm State Agrarian and Technological University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: lesnov_ae@mail.ru).

Поступила: 31.10.2024

Одобрена: 05.11.2024

Принята к публикации: 15.11.2024

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Влияние ультразвуковой обработки на флокулирующую способность раствора полиакриламида / А.В. Чернышев, В.З. Пойлов, Е.С. Шестакова, А.Е. Леснов // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2024. – № 4. – С. 146–158.

Please cite this article in English as:

Chernyshev A.V., Poilov V.Z., Shestakova E.S., Lesnov A.E. Effect of ultrasonic treatment on the flocculating capacity of polyacrylamide solution. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2024, no. 4, pp. 146-158 (In Russ).