

УДК 622.765.061 : 532.61

**ИЗМЕНЕНИЕ ВСПЕНИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ
ПЕНЫ РАСТВОРОВ НЕИОНОГЕННЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ ШЛАМОВ
ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

А. В. Чернышев, В. З. Пойлов, И. Д. Сенькина, Е. С. Шестакова

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
E-mail: alexcher-1997@yandex.ru, Комсомольский проспект, 29, 614990, г. Пермь, Россия*

Исследовано применение ультразвука при предварительной обработке флотационных реагентов, используемых при флотации шламов. Изучено влияние ультразвуковой обработки водных растворов неионогенных собирателей, используемых при флотационном обесшламливании сильвинитовых руд, на изменение характеристик полученных пен: объем и высоту пены, ее кратность, влагосодержание, устойчивость и скорость разрушения. Выявлено повышение вспенивающей способности растворов, кратности и “сухости” пен с увеличением удельной акустической мощности, а также резкое снижение устойчивости пен при повышенных мощностях ультразвуковой обработки. Дана оценка возможности повышения пенообразования и снижения устойчивости трехфазных пен.

Собиратель, флотационное обесшламливание, ультразвуковая обработка, удельная мощность, вспенивающая способность, устойчивость пен, поверхностное натяжение

DOI: 10.15372/FTPRI20240619
EDN: BFSGZC

Россия — один из мировых лидеров по производству и экспорту хлористого калия (KCl), который находит широкое применение в сельском хозяйстве, химической и фармацевтической отраслях. В процессе получения хлорида калия из сильвинитовых руд путем флотационного обогащения калийные предприятия сталкиваются с проблемой отделения глинисто-солевого шлама. Невысокая степень обесшламливания сильвинитовой пульпы приводит к снижению эффективности разделения сильвина и галита в процессе сильвиновой флотации. Даже небольшое содержание шлама в руде и продуктах обогащения отрицательно сказывается на показателях флотационной технологии и процесса обезвоживания [1, 2].

Состав глинисто-солевого шлама сильвинитовых руд и его массовое содержание в разных участках месторождений различны [3]. Состав в основном представлен алюмосиликатами, обладающими большой удельной поверхностью и высокой гидрофобностью, что приводит к высокой сорбции и потерям собирателя сильвиновой флотации. [4].

Совершенствование стадии флотационного обесшламливания руд является приоритетным при повышении эффективности удаления шлама. Пенная флотация — эффективный метод переработки таких минералов, основанный на различиях в гидрофобности поверхности разных материалов [5, 6].

Процесс взаимодействия пузырьков и минеральных частиц играет важную роль во флотации [7, 8]. По сравнению с другими газожидкостными контакторами пены обеспечивают большую площадь контакта между газом и жидкостью [9], создавая значительную платформу для массопереноса, что является определяющей стадией в процессе селективного разделения минералов [10].

При изучении пенообразующих свойств жидкой фазы большое значение имеет анализ двухфазной системы при отсутствии твердой фазы [11]. Способность жидкости к пенообразованию и стабильность пен в статических условиях — два взаимосвязанных параметра, которые используются для описания общего поведения жидких пен [12, 13]. Количественной характеристикой любой пены является ее плотность и удельный объем (отношение объема пены к объему жидкости, образующей стенки пузырьков), который влияет на осыпание частиц [14–16].

Стабильностью пены определяется интенсивность осыпания твердых частиц из объема пены в процессе флотации. При этом стабильные плотные пены отрицательно сказываются на транспортировке и сгущении продуктов стадии обесшламливания [17, 18].

К образованию вязкой пены относится множество факторов, среди которых наиболее важные — свойства частиц, главным образом гидрофобность поверхности, и размер частиц [19, 20]. Как правило, для частиц одинаковой фракции более высокая гидрофобность поверхности может дать более стабильную пену. Глинистые минералы повышают стабильность пены [1, 2]. После удаления из флотокамеры и при транспортировке пенного продукта на стадию сгущения часть пены разрушается естественным образом. Однако во многих случаях в контуре обезвоживания все еще присутствует значительное количество цепкой пены, что снижает эффективность процесса обезвоживания [21, 22].

Для повышения показателей извлечения и качества флотационного продукта необходимо повышение эффективности собирателя и характеристик пен (удельный объем пены, дисперсность пузырьков воздуха, устойчивость пен). Помимо уже известных механических и термических способов улучшения свойств пены, в качестве перспективного направления стоит выделить применение ультразвука [23–25].

За счет эффекта ультразвуковой кавитации происходит изменение многих физико-химических свойств флотореагентов, в том числе и характеристик пен [26–28]. Так, в [29–31] исследовано влияние ультразвуковой обработки (УЗО) на повышение вспенивающей способности используемой при обогащении сальвина собирательной смеси и проведена оценка изменения устойчивости пен при различной интенсивности УЗ-воздействия. Отмечено повышение вспенивающей способности раствора, удельного объема пен и снижение плотности пены после ультразвуковой активации раствора.

Известно, что при сравнении пенообразующих свойств ионогенных и неионогенных поверхностно-активных веществ (ПАВ) адсорбционная способность ионогенных ПАВ на границе с воздухом ниже и их растворы обладают большей пенообразующей способностью [32]. Это объясняется стабилизацией образовавшейся пены двойным электрическим слоем, отсутствующим в случае неионных ПАВ. В связи с этим поиск путей повышения пенообразования, применяемых при флотационном обесшламливании неионогенных ПАВ, приведет в первую очередь к интенсификации процесса флотации.

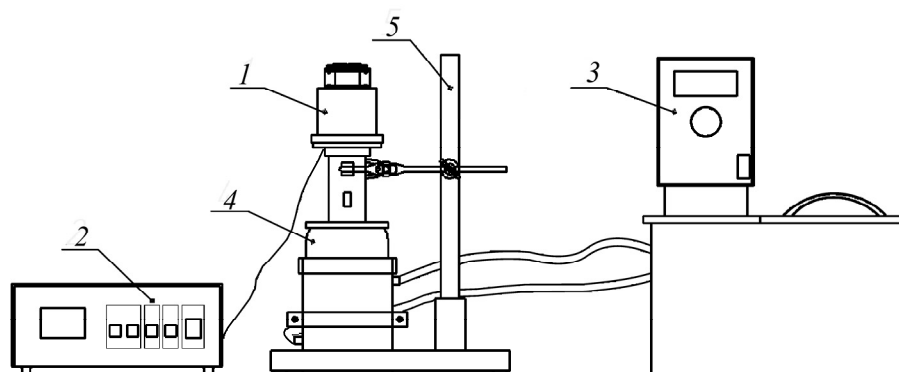
В некоторых случаях, помимо увеличения вспениваемости и стабильности пен, поверхностно-активные вещества должны также увеличивать гидрофобность поверхности минерала, чтобы облегчить их прикрепление к пузырькам, а также повышать степень извлечения шлама [33].

Цель настоящей работы — изучение влияния ультразвуковой обработки неионогенных собирателей, применяемых при флотационном обесшламливании сильвинитовых руд, на изменение вспенивающей способности раствора флотореагента и плотности полученных пен, а также на возможность снижения устойчивости плотных пен стадии шламовой флотации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения влияния ультразвуковой обработки на изменение свойств пен выбраны неионогенные собиратели класса первичные этоксилированные амины Ethomeen HT/40 и оксиэтилированные фенолы Неонол АФ 9-25. Водные растворы этих реагентов получены путем смешивания горячего растворителя 70 °С с расплавленным реагентом и перемешивания в термостате при температуре 70 °С в течение 15 мин. Концентрация водных растворов составляла 2.0 и 5.0 % соответственно. Температура раствора выбрана исходя из особенностей проведения процесса флотации в летнее время и составляла 35 °С.

Ультразвуковую обработку реагентов-собирателей осуществляли с применением ультразвуковой установки погружного типа, представленной на рисунке.



Установка для УЗ-обработки раствора этоксилированного амина: 1 — УЗ-излучающая поверхность; 2 — УЗ-генератор; 3 — термостат; 4 — реактор с рубашкой; 5 — лабораторный штатив

В качестве источника ультразвуковых колебаний использовали ультразвуковой генератор модели УЗТА-0,8/22-ОМУ серии “Волна”. Номинальная рабочая частота установки составляла 22 ± 1.65 кГц. Обработку раствора выполняли в реакторе с рубашкой (4) при удельной мощности обработки в интервале $0.34 - 0.85$ Вт/см³ с шагом 0.17 Вт/см³ и длительности 150 с.

Измерение размера мицелл собирателя проводили с помощью анализатора размеров частиц и молекул Zetasizer Nano ZS методом, основанным на измерении и анализе возникающих из-за неоднородности среды флуктуаций интенсивности рассеянного света в объеме, содержащем коллоидные частицы в растворе, в разные моменты времени.

Поверхностное натяжение раствора собирателя измеряли методом пластинки Вильгельми с применением тензиометра K100C-MK2 фирмы Kruss. Поверхностное натяжение σ рассчитывали по формуле на основе измеренного усилия (F), действующего на пластину в результате смачивания, а также периметра смоченной поверхности (l) и угла контакта (θ):

$$\sigma = \frac{F}{l \cos \theta}, \quad (1)$$

где σ — поверхностное натяжение раствора, мН/м; F — усилие при смачивании поверхности, мН; l — периметр смоченной поверхности, м; θ — угол контакта пластины и жидкости, град.

Измерение динамической вязкости раствора осуществляли с использованием вибровискозиметра SV-10 фирмы AND. Методика определения вязкости основана на измерении резонансной частоты колебаний рабочих дисков вискозиметра в жидкости различной вязкости при заданном значении плотности раствора.

Исследование вспенивающей способности растворов выполняли по методу продувания воздуха через раствор снизу вверх при помощи анализатора пен DFA 100 фирмы Kruss. Методика исследования заключалась в пропускании воздуха с постоянным расходом через постоянный объем собирателя, помещенного в измерительный цилиндр анализатора, и считывании результата измерений с помощью лазерных датчиков света, проходящего через слой образовавшейся пены. На основании измерений максимальной высоты образовавшейся пены и системы “жидкость – пена” определялась способность пенообразования реагента-собирателя до и после ультразвуковой обработки.

Для определения устойчивости полученных пен реагента-собирателя применяли модифицированный метод Росс-Майлса ISO 696 (RMI) [34, 35], а именно замеряли уменьшение объема пены в течение 30, 180, 300 с и рассчитывали среднюю скорость разрушения пены. Конечный временной интервал выбирали исходя из стремления смоделировать длительность процесса шламовой флотации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В [36, 37] изучен эффект диспергирования мицелл неиногенных собирателей шламов под действием ультразвуковой кавитации на низких частотах. Это обусловлено образованием и мгновенным схлопыванием кавитационных пузырьков, сопровождающимся локальным повышением температуры и давления.

После проведения исследования по влиянию ультразвуковой обработки на изменение физико-химических свойств водных растворов собирателей флотационного обесшламливания сильвинитовых руд получены результаты, приведенные в табл. 1. Выбранные в качестве объекта исследования неиногенные собиратели используются на калийных фабриках компании ПАО “Уралкалий”.

ТАБЛИЦА 1. Влияние ультразвуковой обработки растворов собирателей Неонол АФ 9-25 и Ethomeen НТ/40 на изменение физико-химических свойств

Мощность УЗО, Вт/см ³	Неонол АФ 9-25			Ethomeen НТ/40		
	Размер мицелл, нм	Поверхностное натяжение раствора, мН/м	Вязкость раствора, мПа·с	Размер мицелл, нм	Поверхностное натяжение раствора, мН/м	Вязкость раствора, мПа·с
0	6.1 ± 0.2	43.43	1.53	6.4 ± 0.1	42.63	0.93
0.34	6.0 ± 0.3	42.07	1.42	5.6 ± 0.1	41.76	0.85
0.51	5.6 ± 0.3	40.78	1.40	5.5 ± 0.1	41.49	0.84
0.68	5.2 ± 0.2	39.41	1.37	5.2 ± 0.1	41.33	0.71
0.85	4.9 ± 0.1	38.58	1.35	5.1 ± 0.1	40.51	0.67

Как видно из табл. 1, с повышением удельной мощности УЗ-обработки снижается размер мицелл собирателя. Максимальное уменьшение размера мицелл наблюдалось при максимальной мощности обработки 0.85 Вт/см³ и составило 19.7 % для Неонол АФ 9-25 и 20.3 % для Ethomeen НТ/40. Диспергирование мицелл вызывает снижение как вязкости, так и поверхностного натяжения водного раствора. Можно предположить, что это приведет и к изменению свойств пен. Так, по данным работ [38, 39], снижение поверхностного натяжения повышает вспенивающую способность, а снижение вязкости растворов снижает вязкость и устойчивость полученных пен.

В табл. 2 представлена оценка изменения вспенивающей способности растворов собирателей после УЗ-обработки при разной удельной мощности в течение 150 с. Для анализа выбраны следующие параметры пен:

- максимальный объем столба образовавшейся пены ($V_{\max}$);
- максимальная высота столба образовавшейся пены ($H_{\max}$);
- кратность пены — отношение объема пены к объему жидкости, используемой на ее образование, по окончанию процесса пенообразования;
- влажность пены — отношение жидкой части в пене к объему пены по окончанию процесса пенообразования.

ТАБЛИЦА 2. Оценка вспенивающей способности обработанных ультразвуком водных растворов собирателей

Мощность УЗО, Вт/см ³	Неонол АФ 9-25				Ethomeen НТ/40			
	$V_{\max}$, мл	$H_{\max}$, мм	Кратность пены, мл/мл	Влажность пены, мл/мл	$V_{\max}$, мл	$H_{\max}$, мм	Кратность пены, мл/мл	Влажность пены, мл/мл
0	55.7	52.1	6.10	0.17	57.13	45.47	5.30	0.19
0.34	60.85	63.9	6.60	0.17	58.67	46.67	6.25	0.17
0.51	62.8	66.1	6.60	0.15	60.00	47.73	6.30	0.16
0.68	63.95	67.5	7.50	0.13	60.90	48.50	6.80	0.16
0.85	66	68.0	7.55	0.13	63.90	50.85	6.95	0.15

Анализ данных табл. 2 показал повышение вспенивающей способности растворов собирателей с повышением удельной мощности УЗ-воздействия. Как для неонола, так и для этомина наблюдается максимальное повышение объема $V_{\max}$ образовавшейся пены при мощности 0.85 Вт/см³ (на 18.5 и 11.9 % соответственно, по сравнению с контрольным измерением). Также повышение пенообразования подтверждается ростом параметра кратности пены с повышением удельной мощности УЗ-воздействия.

Причина роста количества полученной пены — уменьшение затрачиваемой работы на создание новых поверхностей раздела фаз “жидкость – газ” при снижении поверхностного натяжения раствора [40]. Можно предположить, что при УЗ-воздействии происходит ослабление сил, притягивающих молекулы поверхностного слоя друг к другу. Таким образом, потребуется меньшее количество дисперсной фазы для образования пены.

Наблюдаемое повышение кратности полученных пен приводит к снижению содержания влаги в пене. Одновременно с повышением полидисперсности пены и принятии пузырьками воздуха полиэдрической формы постепенно утончаются пленки, участвующие в образовании пены и служащие в качестве стенок пузырька. Происходит “оголение” некоторых участков пузырьков. Пена становится более “сухой”.

Такое изменение вспенивающей способности растворов, кратности и “сухости” полученных пен непосредственно скажется и на изменении их устойчивости (способности в течение определенного промежутка времени сохранять первоначальный объем). В связи с этим изучено влияние ультразвуковой обработки различной мощности на изменение устойчивости пен собирателей (табл. 3). С помощью пенного анализатора по методу Росс-Майлса замерен объем оставшейся пены через определенные промежутки времени (30, 180 и 300 с). Последний выбран исходя из средней продолжительности процесса флотации как в лабораторных, так и промышленных условиях.

ТАБЛИЦА 3. Влияние ультразвуковой обработки водных растворов собирателей на устойчивость пен

Мощность УЗО, Вт/см ³	Неонол АФ 9-25				Ethomeen HT/40			
	Оставшийся объем пены, мл			Скорость разрушения пены, мл/с	Оставшийся объем пены, мл			Скорость разрушения пены, мл/с
	30 с	180 с	300 с		30 с	180 с	300 с	
0	51.7	28.6	19.0	0.12	46.71	19.85	14.23	0.14
0.34	52.3	35.5	19.6	0.14	47.91	17.49	11.36	0.16
0.51	51.8	35.1	21.3	0.14	48.40	17.91	10.76	0.16
0.68	55.7	28.0	16.5	0.16	48.23	15.52	8.66	0.17
0.85	58.6	21.0	6.5	0.20	51.71	15.66	10.71	0.18

При анализе изменения оставшегося объема пены после выдержки можно заметить, что с повышением удельной мощности УЗ-обработки наблюдается более быстрое снижение объема. Особенно ярко это проявляется для случаев с УЗ-обработкой обоих собирателей удельной мощностью 0.68 и 0.85 Вт/см³. Даже учитывая больший начальный объем пены сразу после завершения пенообразования, уже через 180 с объем пены при этих двух режимах УЗ-обработки ниже, чем у контрольного измерения (без УЗО).

Для сравнения устойчивости пен при разной мощности обработки растворов и без нее вычислена скорость разрушения пены с учетом параметров объема пены сразу после процесса пенообразования и через 300 с. Получена четкая зависимость повышения скорости разрушения пены с повышением мощности УЗ-воздействия. Снижение устойчивости пен после УЗ-обработки в первую очередь обусловлено снижением вязкости растворов, в результате чего усиливается дренаж жидкости под действием гравитационных сил по системе каналов Плато – Гиббса. Повышается сухость полученных пен, и происходит быстрая коалесценция соприкасающихся газовых пузырьков.

Следующим этапом стало изучение влияния ультразвуковой обработки собирателя на изменение физико-химических свойств системы “солевой раствор – собиратель”. Подтверждено снижение поверхностного натяжения и вязкости системы при введении собирателя, обработанного ультразвуком при разной удельной мощности (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Влияние ультразвуковой обработки системы “солевой раствор – собиратель” на изменение физико-химических свойств раствора

Мощность УЗО, Вт/см ³	Система “солевой раствор – неонол”		Система “солевой раствор – этомин”	
	Поверхностное натяжение, мН/м	Вязкость, мПа·с	Поверхностное натяжение, мН/м	Вязкость, мПа·с
0	38.99	2.04	41.47	1.63
0.34	38.92	1.69	41.41	1.60
0.51	38.60	1.68	41.34	1.58
0.68	38.27	1.66	41.29	1.55
0.85	37.80	1.57	39.07	1.46

Вспенивающую способность данной системы оценить достаточно сложно, так как устойчивость такой пены без присутствия твердой фазы очень низкая. Оценку вероятного повышения вспенивающей способности системы можно дать по снижению поверхностного натяжения раствора, а снижение устойчивости полученных пен — по снижению вязкости.

С повышением мощности ультразвуковой обработки раствора собирателя наблюдается снижение поверхностного натяжения солевого раствора при добавлении УЗ-обработанного собирателя, что указывает на возможность увеличения вспенивающей способности системы “солевой раствор – собиратель”.

Снижение вязкости этой системы при повышении мощности УЗО собирателя свидетельствует о возможном повышении скорости разрушения полученной трехфазной пены, в которой в качестве твердой фазы выступает мелкодисперсные глинисто-солевые минералы.

ВЫВОДЫ

Проведение ультразвуковой обработки, применяемой при обесшламливании сильвинитовых руд неиногенных собирателей при различных мощностях, продемонстрировало снижение поверхностного натяжения и вязкости растворов, вызванное кавитационным диспергированием мицелл собирателя. Доказано повышение вспенивающей способности растворов собирателей, кратности и “сухости” полученных пен.

По методу Росс-Майлса выявлено снижение устойчивости полученных пен при повышении удельной мощности УЗ-обработки, которое вызвано снижением вязкости пенообразующего раствора. Особенно четко это проявляется при повышенных мощностях 0.68 и 0.85 Вт/см³.

Дана оценка возможности повышения пенообразования и снижения вязкости и устойчивости трехфазных пен при шламовой флотации посредством снижения поверхностного натяжения и вязкости системы “солевой раствор – собиратель” после добавления УЗ-обработанного собирателя.

Результаты исследования могут найти применение при флотационном обесшламливании руд, расширяя представления о возможностях использования ультразвука при обработке собирателей шламов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farrokhpay S., Ndlovu B., and Bradshaw D. Behaviour of swelling clays versus nonswelling clays in flotation, J. Miner. Eng., 2016, Vol. 96. — P. 59–66.
2. Jeldres R. I., Uribe L., Cisternas L. A., Gutierrez L., Leiva W. H., and Valenzuela J. The effect of clay minerals on the process of flotation of copper ores — A critical review, J. Appl. Clay Sci., 2019, Vol. 170. — P. 57–69.
3. Рыльникова М. В., Бергер Р. В., Яковлев И. В., Татарников В. И., Зубков П. О. Техничко-технологические решения по закладке выработанного пространства при отработке глубокозалегающих пластов сильвинита // ФТПРПИ. — 2024. — № 2. — С. 167–176.
4. Середкина О. Р., Рахимова О. В., Лановецкий С. В. Исследование влияния фракционного состава сильвинитовой руды на эффективность флокуляции глинистого шлама // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. — Екатеринбург, 2016. — Т. 3. — С. 240.
5. Irannajad M., Nuri O. S., and Mehdilo A. Surface dissolution-assisted mineral flotation: a review, J. Environ. Chem. Eng., 2019, Vol. 7. — P. 37–43.
6. Gao Z., Bai D., Sun W., Cao X., and Hu Y. Selective flotation of scheelite from calcite and fluorite using a collector mixture, J. Miner. Eng., 2015, Vol. 72. — P. 23–26.
7. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П. Поведение флотационного комплекса “минеральная частица – пузырек” в слабвязкой жидкости в процессе флотации // ФТПРПИ. — 2024. — № 1. — С. 143–154.

8. Wang H., Yang W., Yan X., Wang L., Wang Y., and Zhang H. Regulation of bubble size in flotation: a review, *J. Environ Chem. Eng.*, 2020, Vol. 8, No 5. — 104070.
9. Shah P. S. and Mahalingam R. Mass transfer with chemical reaction in liquid foam reactors, *J. AIChE*, 1985, Vol. 30, No 6. — P. 24–34.
10. Ashrafizadeh S. N. and Ganjizade A. Liquid foams: Properties, structures, prevailing phenomena and their applications in chemical/biochemical processes, *J. Adv. Colloid Interface Sci.*, 2024, Vol. 325. — 103109.
11. Богданов О. С., Максимов И. И., Поднек А. К., Янис Н. А. Теория и технология флотации руд. — М.: Недра, 1990. — 363 с.
12. Belhajj A. and Almahdy O. Foamability and foam stability of several surfactant solutions: the role of screening and flooding, *J. Pet Environ Biotechnol*, 2015, Vol. 6, No 4. — 1000227.
13. Wang J., Nguyen A. V., and Farrokhpai S. A critical review of the growth, drainage and collapse of foams, *J. Adv. Colloid Interface Sci.*, 2016, Vol. 228. — P. 55–70.
14. le Roux J. D. and Craig I. K. State controllability of a froth flotation cell, *J. IFAC-Pap*, 2019, Vol. 52, No 14. — P. 54–59.
15. Prud'homme R. *Foams: Theory: Measurements: Applications*, Routledge, 2017. — 609 p.
16. Sakai T. and Kaneko Y. The effect of some foam boosters on the foamability and foam stability of anionic systems, *J. Surfactants Deterg.*, 2004, Vol. 7, No 3. — P. 291–295.
17. Fang J., Ge Y., and Yu J. Effects of particle size and wettability on froth stability in a collophane flotation system, *J. Powder Technol*, 2021, Vol. 379. — P. 576–584.
18. Zhang N., Chen X., Peng Y. Effects of froth properties on dewatering of flotation products — A critical review, *J. Miner. Eng*, 2020, Vol. 155. — P. 106477.
19. Mackay I., Mendez E., Molina I., Videla A. R., Cilliers J. J., and Brito-Parada P. R. Dynamic froth stability of copper flotation tailings, *J. Miner. Eng.*, 2018, Vol. 124. — P. 103–107.
20. Szczerkowska S., Wiertel-Pochopien A., Zawala J., Larsen E., and Kowalczyk P. B. Kinetics of froth flotation of naturally hydrophobic solids with different shapes, *J. Miner. Eng.*, 2018, Vol. 121. — P. 90–99.
21. Zhang N., Chen X., Nicholson T., and Peng Y. The effect of froth on the dewatering of coals, *J. An Oscillatory Rheology Study*, 2018, Vol. 222. — P. 362–369.
22. Zhang N., Chen X., Nicholson T., Peng Y. The effect of saline water on the settling of coal slurry and coal froth, *J. Powder Technol.*, 2019, Vol. 344. P. — 161–168.
23. Вилкова Н. Г., Мишина С. И., Депутатов Е. Д. Влияние водородного показателя среды на свойства и устойчивость пен, содержащих диоксид титана в качестве стабилизатора // Collection of scientific papers on materials IX International Scientific Conference. — Люксембург, 2019. — Т. 1. — С. 50–53.
24. Лихоманов А. О., Говор Э. Г., Камлюк А. Н. О взаимосвязях геометрических параметров оросителя, устойчивости и кратности получаемой пены // Вестн. университета гражданской защиты МЧС Беларуси. — 2021. — Т. 5. — № 2. — С. 174–185.
25. Вилкова Н. Г., Мишина С. И., Кузнецов Д. А. Влияние ультразвука на изменение объемной доли жидкости в пене и ее устойчивость // Вестн. технол. ун-та. — 2024. — Т. 27. — № 1. — С. 36–40.
26. Буров В. Е., Пойлов В. З., Потапов И. С., Кузьминых К. Г. Влияние ультразвуковой обработки собирателя сильвиновой флотации на его структурные свойства и коллоидное состояние // ФТПРПИ. — 2024. — № 1. — С. 165–174.
27. Ozkan S. G. Further Investigations on Simultaneous Ultrasonic Coal Flotation, *J. Minerals*, 2017, Vol. 7, No 10. — P. 177.
28. Chen Y., Truong N.T., Bu X., and Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation, *J. Ultrason. Sonochem*, 2020, Vol. 60. — P. 104739.

29. **Burov V. E., Poilov V. Z., Sazhina M. M., and Huang Zh.** Effect of ultrasound on reagent compositions foaming properties used in mineral flotation, *J. ChemTech*, 2022, Vol. 65, No 9. — P. 81–89.
30. **Буров В. Е., Галлямов А. Н., Федотова О. А., Пойлов В. З.** Влияние ультразвуковой обработки на вспенивающую способность раствора солянокислого амина // *Вестн. ПГНИУ*. — 2020. — Вып. 4. — С. 133–147.
31. **Мунин Д. А., Вахрушев В. В., Пойлов В. З.** Оценка вспенивающей способности и устойчивости пен раствора солянокислого амина после ультразвуковой обработки // *Вестн. ПГНИУ*. — 2015. — Вып. 4. — С. 101–110.
32. **Абрамзон А. А., Бочаров В. В. и др.** Поверхностно-активные вещества: справочник. — Л.: Химия, 1979. — 376 с.
33. **Vazquez M., Fuentes J., Hincapie A., Garbayo I., Vilchez C., and Cuaresma M.** Selection of microalgae with potential for cultivation in surfactant-stabilized foam, *J. Algal Research*, 2018, Vol. 31. — P. 216–224.
34. **Samanta S. and Ghosh P.** Coalescence of bubbles and stability of foams in aqueous solutions of tween surfactants, *J. Chem. Eng. Res. Design*, 2011, Vol. 89, No 11. — P. 2344–2355.
35. **Delforce L. and Tcholakova S.** Role of temperature and urea for surface and foam properties of nonionic surfactants with dodecyl alkyl chain, *J. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, Vol. 691. — 133844.
36. **Chernyshev A. V., Burov V. E., and Poilov V. Z.** Effect of ultrasound on a viscosity-temperature properties of collector for sludge flotation // *Химия. Экология. Урбанистика: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием)*. — Пермь, 2022. — Т. 2. — С. 195–198.
37. **Чернышев А. В., Пойлов В. З., Буров В. Е., Кузьминых К. Г.** Влияние ультразвуковой обработки на физико-химические характеристики флотационных собирателей, применяемых при обесшламливании сильвинитовых руд // *Обогащение руд*. — 2023. — № 5. — С. 25–30.
38. **Arzhavitina A. and Steckel H.** Foams for pharmaceutical and cosmetic application, *Int. J. Pharmaceutics*, 2010, Vol. 394, No 1-2. — P. 1–17.
39. **Fameau A. and Salonen A.** Effect of particles and aggregated structures on the foam stability and aging, *Comptes Rendus Physique*, 2014, Vol. 15, No 8-9. — P. 748–760.
40. **Тихомиров В. К.** Пены. Теория и практика их получения и разрушения. — М: Химия, 1975. — 264 с.

Поступила в редакцию 16/VI 2024

После доработки 23/X 2024

Принята к публикации 08/XI 2024