

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОНОХИМИИ ПРИ ФЛОТАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ РУД

В.Е. Буров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия, e-mail: vladimire.burov@gmail.com

Аннотация: Проведен теоретический анализ перспективного метода ультразвуковой обработки для повышения эффективности флотации твердых полезных ископаемых. Рассмотрены теоретические основы сонохимии (звучоимии), а также проанализированы эффекты, возникающие при ультразвуковой обработке различных сред в процессе флотационного обогащения полезных ископаемых, включая переходную и стабильную кавитации, эффект силы акустического излучения. Объяснены факторы влияния сонохимического воздействия на эффективность флотации, которые в первую очередь связаны с ультразвуковой кавитацией, а также с силой акустического излучения. Выделены два основных направления, которые изучаются различными мировыми научными сообществами в последние два десятилетия: ультразвуковая обработка пульпы или флотационных реагентов до процесса флотации, при этом рассматриваются процессы эмульгирования или диспергирования реагентов, удаление оксидных пленок с поверхности минеральной частицы, обесшламливание под действием ультразвукового поля; второе направление — ультразвуковая обработка в процессе флотации, влияющая на размер пузырьков воздуха, разделение пустой породы от ценного материала, пенообразование и т.д. Наиболее перспективными с точки зрения использования ультразвука на флотационных обогатительных фабриках являются ультразвуковая обработка рудной суспензии, которая способствует удалению глинисто-солевых шламов и оксидных пленок с поверхности минералов, а также предварительная сонохимическая обработка флотационных реагентов, которая изменяет многие физико-химические характеристики реагентов, тем самым улучшая эффективность флотации.

Ключевые слова: флотационное обогащение, ультразвуковая обработка, флотационные реагенты, кавитация, эффективность флотации, акустическое излучение, диспергирование, обесшламливание, пульпа.

Для цитирования: Буров В. Е. Возможности применения сонохимии при флотации минеральных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 36–51. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_36.

Capabilities of sonochemistry in flotation of ore minerals

V.E. Burov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: vladimire.burov@gmail.com

Abstract: A promising method of ultrasonic treatment is theoretically analyzed with regard to the improvement of solid mineral flotation efficiency. The theoretical framework of sonochemistry (acoustochemistry), and the effects induced in ultrasonic treatment of different media

during mineral flotation are analyzed, including transient and steady-state cavitation, and the effect of acoustic emission force. The factors of the sonochemistry influence on flotation efficiency are explained, and these factors are primarily connected with ultrasonic cavitation and with acoustic emission force. The article identifies two main research areas addressed by the world scientific communities in the last two decades: ultrasound treatment of pulp or flotation agents before flotation, including the processes of emulsification or dispersion of the agents, removal of oxide films from particle surface, and desliming in the supersonic field; ultrasound treatment during flotation, which exerts an influence on the size of air bubbles, separation of barren rock from high-value material, frothing, etc. Regarding application of ultrasound at flotation factories, the most promising approach is the ultrasound treatment of ore pulp, which promotes removal of clay-salt slimes and oxide films from the surface of mineral particles, and the preliminary sonochemical treatment of flotation agents, which changes many physico-chemical characteristics of the agents and improves flotation efficiency thereby.

Key words: flotation, ultrasound treatment, flotation agents, cavitation, flotation efficiency, acoustic emission, dispersion, desliming, pulp.

For citation: Burov V. E. Capabilities of sonochemistry in flotation of ore minerals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1):36-51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_36.

Введение

В последние годы наметилась устойчивая тенденция увеличения объемов потребления угля, удобрений, различных руд и строительных материалов, что требует увеличения комплексности использования полезных ископаемых при их переработке и обогащении [1]. В настоящее время флотация занимает лидирующее положение среди технологий обогащения твердых полезных ископаемых. Флотационная технология является эффективным средством разделения гетерогенных смесей, основанного на различии способностей минералов удерживаться на межфазовой поверхности.

Основные преимущества использования технологии флотации в том, что процесс обогащения ведется при небольших энергетических затратах и низкой температуре, применяется простая аппаратная схема [2].

Кроме того, возрастающее значение флотационных методов обогащения обусловлено вовлечением в переработку бедных, содержащих большое количест-

во шламыстых соединений и труднообогатимых руд и углей [3].

Однако не всегда результаты флотации соответствуют промышленным требованиям из-за таких факторов, как мелкая крупность минералов, потери ценного продукта с отвалами, низкая растворимость в водных растворах и большой расход дорогостоящих флотационных реагентов, малоустойчивая или, наоборот, слишком устойчивая пена флотационного концентрата, зашламливание частиц руды, поверхностное окисление минералов и углей и др. [4].

Перспективным направлением улучшения эффективности флотации и снижения влияния перечисленных факторов является применение ультразвуковых (сонохимических) технологий, которые широко используются в различных отраслях промышленности [5, 6]. Кроме того, ультразвуковая обработка является малоэнергоёмким и безопасным процессом [7]. Применение ультразвука при флотационном обогащении полезных ископаемых изучается мировым науч-

ным сообществом в течение последних нескольких десятилетий [5, 8–10]. Однако до сих пор нет точного понимания теоретических основ влияния ультразвука на эффективность флотации, процесс ультразвуковой обработки мало изучен.

Цель статьи — анализ теоретических основ сонохимии, которые объясняют причины влияния ультразвуковой обработки на эффективность флотации, а также обзор применения ультразвуковых технологий при флотации различных типов твердых полезных ископаемых.

Во разделе «Основы сонохимии» даны краткие теоретические сведения о сонохимии: химических и физико-химических эффектах, которые возникают при взаимодействии мощных акустических волн с веществом, сонолизе (образование, рост и схлопывание парагазовых пузырьков в жидкости), кавитации и силе акустического излучения, а также динамике парагазового пузырька в ультразвуковом поле.

Раздел «Влияние сонохимии на флотацию» описывает причины влияния ультразвука на флотацию. Здесь подробно объясняются основные эффекты ультразвука, которые изменяют эффективность флотации: переходная кавитация, при которой происходит схлопывание кавитационных пузырьков, а также стабильная кавитация и сила акустического излучения. Переходная кавитация объясняет такие эффекты, как диспергирование флотационных реагентов, обесшламливание, удаление оксидных пленок с поверхности минералов. При стабильной кавитации и силе акустического излучения проявляется эффект агрегирования вещества и парагазовых пузырьков.

Раздел «Использование ультразвуковой обработки при флотации минеральных руд» посвящен применению ультразвуковой обработки при флотации полезных твердых ископаемых. Раздел

включает два основных направления: ультразвуковая обработка пульпы или флотационных реагентов до флотации, при этом рассматриваются процессы эмульгирования или диспергирования реагентов, удаление оксидных пленок с поверхности минеральной частицы, обесшламливание под действием ультразвукового поля; и ультразвуковая обработка в процессе флотации.

Основы сонохимии

Сонохимия, или звукохимия, изучает взаимодействия мощных акустических волн с веществом, при которых возникают химические и физико-химические эффекты. Для возникновения данных эффектов в среде (обычно — в жидкости) необходимо действие акустических волн достаточной мощности — т.н. сонолиз, при котором происходит образование и рост парагазовых пузырьков в жидкости, которые колеблются, пульсируют, быстро сжимаются и схлопываются. Образование и изменения такого рода пузырьков называется кавитацией (нарушение сплошности жидкости). Кроме кавитации в процессе ультразвуковой обработки также возникает сила акустического излучения. При этом если кавитация связана с поведением динамики парагазовых пузырьков, то сила акустического излучения относится к движению частиц или пузырьков в звуковом поле [11].

Одновременно с кавитацией и силой акустического излучения в звуковом поле могут возникать различные физико-химические эффекты: сонолюминесценция (свечение жидкости), диспергирование твердых тел, эрозия их поверхности, эмульгирование (образование эмульсий несмешивающихся жидкостей). Перечисленные физико-химические эффекты, возникающие под действием ультразвука, оказывают значительное влияние на протекание физико-химических реакций

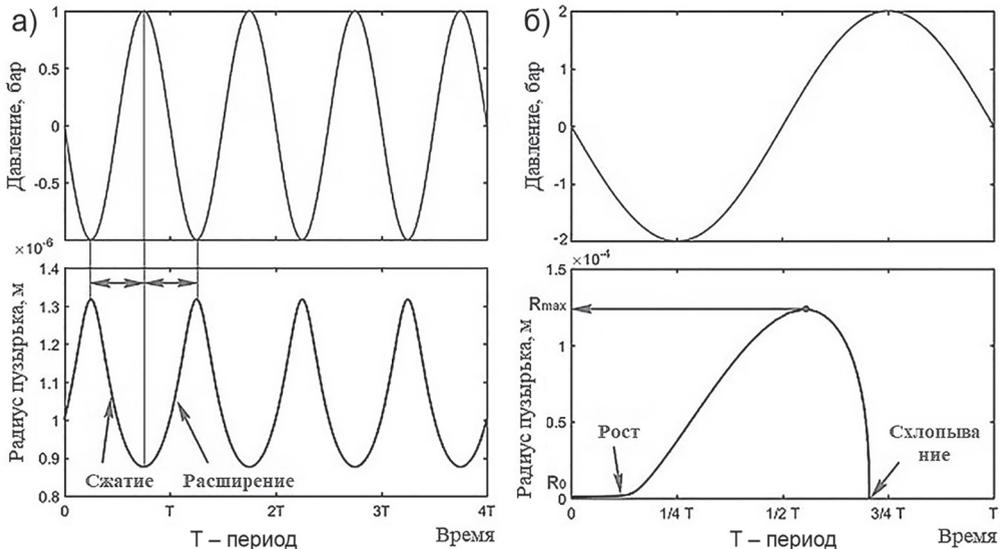
в акустическом поле, которые отличаются большим разнообразием: ускорение некоторых химических реакций за счет эмульгирования жидких компонентов, диспергирования твердых компонентов реакции или катализаторов, дегазации или, наоборот, образования более мелких пузырьков газа, предотвращения коагуляции или, напротив, агрегации частиц вещества, десульфурации, интенсификации перемешивания и т.д. [12].

Как известно [13, 14], парогазовые зародыши изначально существуют в жидкой среде (например, в воде). Кавитация является разновидностью гетерогенной кавитации, которая описывает зарождение и динамику (поведение) пузырьков в жидкой среде. На основе уравнений идеального одиночного пузырька Рэля [15] и движения кавитационного пузырька Плесета [16] Нолтинг и Непайрас [17] получили модифицированное уравнение с учетом изменения температуры в процессе кавитации:

$$P_B(T_\infty) - P_\infty(t) = \frac{2\sigma}{R} + \rho_L \left(\frac{\infty}{RR} + \frac{3}{2} \frac{\sigma^2}{R} \right) + 4\mu \frac{\dot{R}}{R} - \left(P_\infty(0) - P_V(T_\infty) + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k}, \quad (1)$$

где R — радиус пузырька; ρ , σ , μ — плотность, поверхностное натяжение и вязкость жидкости, соответственно; P — давление газа в жидкости; T_∞ — неизменная температура жидкости; k — отношение теплоемкостей.

После численного интегрирования уравнения (1) можно получить кривую с сильной нелинейностью [5]. На рисунке показаны кривые изменения размера пузырька под действием ультразвука с частотой 20 кГц, построенные по уравнению (1). При максимальном давлении в 1 бар зародыши радиусом 1 мкм бесконечно колеблются в воде, не увеличиваясь в размерах. Однако при достижении давления в 2 бара зародыши быстро увеличиваются в размерах, а затем



Воздействие ультразвука частотой 20 кГц на рост и схлопывание переходного пузырька из зародыша размером 1 мкм: максимальное давление в 1 бар (100 кПа) (а); максимальное давление в 2 бара (200 кПа) (б)

Effect of 20 kHz ultrasound on growth and collapse of transient cavitation bubble from 1 μm nuclei: maximum pressure at 1 bar (100 kPa) (a); maximum pressure at 2 bar (200 kPa) (b)

схлопываются в течение одного периода. Этот феномен известен как «переходная, или инерционная, кавитация». При схлопывании кавитационного пузырька локально возникают высокая температура (5000 °С) и высокое давление (2000 атм). Схлопывание зародышей также является причиной кавитационного эффекта.

Однако в уравнениях Рэля-Плессета-Нолтинга-Непайраса не учитываются взаимодействия пузырьков между собой, при этом данные уравнения могут применяться только для одиночного кавитационного пузырька в условиях, когда пузырек неподвижен (стоячая волна). В работе [18] получены уравнения динамики пузырька в кавитационном поле с учетом взаимодействия пульсирующих и совершающих поступательное движение пузырьков. При этом анализ полученной системы уравнений для динамики пузырька в кавитационном поле указывает на то, что кавитационное поле — это не просто сумма большого числа пульсирующих совместно и независимо друг от друга пузырьков, а сложная система, между элементами которой существуют многочисленные и разнообразные связи.

Как видно из изложенного выше, при повышении давления динамика парогазовых зародышей существенно изменяется. С целью обозначения минимально необходимого давления, которое требуется для изменения динамики пузырьков, используют термин «кавитационный порог» [19]. Динамика пузырьков (их поведение) в акустическом поле подразделяется на три типа: осцилляция (колебание), рост и схлопывание [20]. Минимальное давление, которое требуется для перехода от осцилляции к росту пузырька, называется «диффузионным порогом». Если же давление продолжит увеличиваться, то пузырек перейдет от роста к схлопыванию. При этом минимальное давление, которое требуется

для данного процесса, называется «порог Блейка» (или «нижний переходный порог кавитации»). Таким образом, повышение давления является основной причиной изменения поведения пузырьков или парогазовых зародышей [21]. Однако если размер пузырька больше, чем его резонансный радиус, то дальнейший рост пузырька будет ограничиваться, в этом случае пузырек будет расширяться до тех пор, пока не выйдет на поверхность воды [22]. С помощью перечисленных порогов кавитации можно предсказать поведение пузырьков при различных акустических условиях [23].

Ультразвуковое воздействие на пузырьки будет усиливаться, если размер пузырька близок к резонансному радиусу этого пузырька. Резонансный радиус пузырька зависит от частоты звукового поля [24]:

$$\omega_r = \frac{1}{R_0 \sqrt{\rho_L}} \left[3k \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - P_v \right) - \frac{2\sigma}{R_0} - \frac{4\mu^2}{\rho_L R_0^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где ω_r — резонансная частота пузырька; ρ , σ , μ — плотность, поверхностное натяжение и вязкость жидкости, соответственно; P_0 — гидростатическое давление; R_0 — радиус пузырька; k — отношение теплоемкостей.

Сила акустического излучения возникает из-за градиента давления вокруг частиц или пузырьков, который становится особенно заметным в ультразвуковом поле стоячей волны [25]. При этом сила акустического излучения, воздействующая на пузырьки, будет отличаться от силы, направленной на частицы, которая зависит только от размера пузырьков.

Влияние сонохимии на флотацию

Кавитация и сила акустического излучения являются основными эффектами

ми ультразвука, возникающими в воде, которые зависят от различных факторов воздействия (см. раздел «Основы сонохимии»). При этом кавитационные эффекты изменяются при разных частоте и давлении и в зависимости от типов кавитационных порогов подразделяются на два вида: переходная и стабильная кавитации. Именно различные виды кавитации, а также сила акустического излучения могут изменять эффективность флотации.

Например, при использовании низкочастотного ультразвука (20–50 кГц) будет проявляться переходный вид кавитации: при схлопывании переходных кавитационных пузырьков наблюдаются такие эффекты, как удаление частиц или оксидных пленок с поверхности кристаллов, диспергирование. При этих частотах ультразвука на вещество оказывает влияние не само ультразвуковое воздействие, а схлопывание кавитационных пузырьков. В работе [5] показано кратковременное воздействие переходной кавитации на газовый пузырек и каплю масла, находящиеся в воде. Пузырек и капля масла формировались и закреплялись на пружинной игле. При схлопывании кавитационных пузырьков пузырьрек и капля масла разрушаются мощным струйным потоком. Благодаря переходной кавитации крошечные пузырьки отрываются от большого пузыря, а капли масла диспергируются.

Кроме того, гидрофобная поверхность минерала под воздействием ультразвука может подвергаться глубокой очистке от гидрофильных частиц вследствие образования переходных кавитационных пузырьков. После чего поверхность минерала становится более гидрофобной, что позволяет ей лучше флотироваться [26].

Важно отметить, что после переходной кавитации локально возрастают температура (5000 °С) и давление (2000 атм) [27], под действием которых молеку-

лярные связи могут разрываться на две свободнорадикальные молекулы со свободным электроном, например, молекулы воды: $\cdot\text{H}$ и $\cdot\text{OH}$ [28]. При этом свободные радикалы могут соединяться друг с другом, что приводит к различным реакциям, например, к реакциям окисления [29].

При дальнейшем увеличении частоты ультразвука (до 1000 кГц) влияние переходной кавитации ослабевает, тогда как влияние стабильной кавитации и силы акустического излучения на парогазовые пузырьки возрастает. В отсутствие переходной кавитации и вызванных ею схлопываний пузырьков стабильные кавитационные пузырьки начинают образовываться на поверхности частиц, при этом сила акустического излучения направлена не на частицы, а на парогазовые пузырьки, благодаря чему частицы начинают агрегироваться [30]. Большое количество пузырьков образуется за счет диффузии и коалесценции. Вследствие чего стабильные пузырьки, образуясь на гидрофобной поверхности минерала, могут улучшать его флотиремость [31]. Как правило, размер стабильных кавитационных пузырьков намного меньше, чем у обычных флотационных пузырьков, что полезно для повышения эффективности столкновения с небольшими частицами при флотации [32].

На частоте более 1000 кГц (1 МГц) влияние кавитационных эффектов ослабевает, при этом значительным становится влияние силы акустического излучения на частицы, благодаря чему проявляется интересный эффект «акустофорез» (направленное расположение частиц под действием ультразвуковых стоячих волн) [33]. Акустофорез аналогичен электрофорезу капель в электростатическом поле. Акустические стоячие волны способствуют агрегации однородно взвешенных частиц благодаря

разнице в плотности и величине сжимаемости между диспергированной частицей и жидкостью (водой). Направление расположения частиц зависит от знака коэффициента акустофореза. Такие агрегированные частицы образуют полосы, которые и способствуют слиянию частиц [34].

Использование ультразвуковой обработки при флотации минеральных руд

Применение ультразвука в процессе флотационного обогащения полезных ископаемых может оказывать положительное влияние на извлечение ценных продуктов. В работах [35, 36] авторы сообщают, что модификация поверхностей минеральных частиц за счет ультразвуковой кавитации может вызвать значительные изменения в адсорбции собирателей на минеральных поверхностях, что, соответственно, повлияет на эффективность флотации.

Исследования влияния ультразвука на эффективность минеральной флотации включают два разных направления:

- ультразвуковая обработка пульпы или флотационных реагентов до флотации, при этом рассматриваются процессы эмульгирования или диспергирования реагентов, удаление оксидных пленок с поверхности минеральной частицы, обесшламливание под действием ультразвукового поля;
- ультразвуковая обработка в процессе флотации.

Обесшламливание поверхности частиц минералов

В процессе флотации различных минеральных руд глинисто-солевой шлам (ГСШ) налипает к поверхности ценного минерала [37], тем самым образуя на ней гидрофильную «броню», из-за чего ухудшается адгезия между частицами и пузырьками или флотационными реа-

гентами [38]. Основываясь на эффектах ультразвуковой кавитации, налет ГСШ можно удалить с поверхности минерала.

Вахрушев и др. [39] выявили, что при ультразвуковой обработке водно-солевых суспензий степень обесшламливания сильвинитовых руд повышается на 20–38% за счет диспергирования агрегатов нерастворимого остатка, имеющих низкую энергию связи между частицами, и эффекта кавитации, вызывающего образование и разрыв микропузырьков на границе раздела фаз сильвин – частица ГСШ.

Bandini и др. [40] исследовали очистку поверхности кварца от шлама с помощью ультразвуковой ванны. Эффективность очистки определяли с помощью спектрофотометра UV-Vis NIR, чтобы показать удаление шламовых налетов в отсутствие и при наличии ультразвуковой обработки. После обработки звуковыми волнами мощностью 150 Вт в течение 10 мин доля удаленных шламов увеличилась с 20 до 95% при pH 4.

Altun и др. [36] изучали влияние ультразвуковой обработки на флотационные характеристики горючих сланцев. Флотацию горючего сланца фракции –150 мкм обрабатывали ультразвуком мощностью от 50 до 250 Вт. Результаты сканирующей электронной микроскопии (SEM) показали, что после ультразвуковой обработки из пор и полостей поверхности флотационного концентрата высвобождаются мелкие неорганические частицы. Кроме того, анализ дифракции рентгеновских лучей флотационного концентрата показал, что неорганическая составляющая значительно уменьшилась. В результате зольность двух образцов горючих сланцев при ультразвуковой обработке была снижена на 23 и 35%.

Удаление оксидных пленок

Известно [41], что при флотации сульфидов и угля образуемая на поверхности

флотируемых частиц оксидная пленка снижает эффективность флотации.

Например, на поверхности угля могут образовываться такие гидрофильные кислородсодержащие функциональные группы, как карбоксильная, фенольная, карбонильная, которые уменьшают вероятность адгезии и увеличивают вероятность отрыва частицы от воздушного пузырька из-за снижения гидрофобности поверхности угольных частиц [42]. Ультразвуковая обработка может использоваться в решении данной проблемы.

Misra и др. обнаружили [43], что предварительная ультразвуковая обработка рудной суспензии улучшает флотационное извлечение арсенопирита. Флотацию образца арсенопирита размером 38–120 мкм проводили с использованием модифицированной трубки Холлимонда. После длительного воздействия ультразвуком знак дзета-потенциала изменился с отрицательного на положительный. При этом оксидная пленка с поверхности минерала была удалена, так как частицы арсенопирита стали флотируемыми.

Сао и др. [44] изучали флотацию окисленного пирита с использованием ультразвуковой обработки с частотой 28 кГц и мощностью до 100 Вт. Образцы пирита окисляли в растворе H_2O_2 в течение 12 и 20 мин. После ультразвуковой обработки в течение 20 с контактный угол смачивания пирита увеличился с 30° до 60° . Кроме того, авторы исследования определили, что эффективность воздействия ультразвука на оксидную пленку определяется длительностью и интенсивностью ультразвуковой обработки. Притом более длительная ультразвуковая обработка может снизить гидрофобность окисленного пирита.

При использовании оптимальных режимов ультразвуковой обработки степень извлечения железа улучшилась с 61,09 до 81,03%.

Хи и др. [45], используя результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS), оценили эффект ультразвуковой очистки от оксидной пленки на поверхности угля. Образцы угля, окисленные в растворе H_2O_2 (30%) в течение 24 ч, были предварительно обработаны ультразвуковым излучателем, имеющим частоту 40 кГц, в течение 0, 3, 5, 10 и 20 мин. Отношение $C - C/C - H$ увеличилось после ультразвуковой обработки в течение 10 мин, что указывает на то, что поверхность угля была очищена (обнажена), при этом оксидные пленки были удалены ультразвуковой обработкой. Кроме того, результаты флотации показали, что максимальное улучшение степени извлечения произошло после обработки ультразвуком длительностью 10 мин.

Во многих работах также указывалось, что ультразвук может как удалять, так и создавать оксидную пленку на поверхности минералов [5, 44, 45]. Максимальная эффективность флотации достигается при оптимальной длительности ультразвуковой обработки. Однако после превышения оптимальной длительности ультразвуковой обработки поверхность частиц может снова окисляться, что отрицательно сказывается на эффективности флотации.

Образование воздушных пузырьков

Известно [46], что на эффективность флотации влияет размер воздушных пузырьков, который обратно пропорционален вероятности столкновения флотируемых частиц с пузырьком. Ранее авторы работы [47] обнаружили, что ультразвуковая обработка пульпы в процессе флотации уменьшает размер воздушных пузырьков, что положительно сказывается на эффективности флотации.

Образование по размерам более мелких воздушных пузырьков при ультра-

звуковой обработке может быть обусловлено двумя факторами (см. раздел «Основы сонохимии»):

- стабильными кавитационными пузырьками, образующимися из парогазовых зародышей;
- небольшими пузырьками, которые образуются из более крупных пузырьков за счет эффекта схлопывания.

В то же время авторами сообщалось [48], что с увеличением мощности ультразвукового воздействия на пульпу устойчивость агрегатов «пузырек-частица» снижается из-за отрыва крупных частиц под действием акустического поля, тем самым ухудшая эффективность флотации сильвина фракции 0,5–1,0 мм.

Как и в случае с ультразвуковой обработкой минеральных поверхностей, содержащих оксидную пленку, следует учитывать длительность и мощность воздействия ультразвука, чтобы эффект для флотации был максимальным.

Агрегация

Под воздействием ультразвукового поля твердые частицы, капли масла или воздушные пузырьки могут агрегироваться, причем в ультразвуковых полях стоячей волны благодаря силе акустического излучения данный процесс можно контролировать [25].

Широко известно использование ультразвука в процессах разделения нефти и воды [34, 49]. В данном случае капли масла, находясь в ультразвуковом поле стоячей волны, под воздействием силы акустического излучения начинают агрегироваться. Однако применение ультразвукового агрегирования в процессах минеральной флотации мало изучено.

Спен и др. [50] исследовали флотацию угля с использованием ультразвуковой обработки. Было показано, что на поверхности угольных частиц образуются устойчивые кавитационные пузырьки, которые соединяются с другими

угольными частицами, образуя агрегаты. После агрегации частиц скорость флотации заметно улучшилась. Извлечение флотации увеличилось с 57 до 68% при времени флотации 2 мин.

Диспергирование флотационных реагентов

Как сообщалось ранее (см. раздел «Основы сонохимии»), благодаря ультразвуковой обработке наблюдается эффект схлопывания кавитационных пузырьков, который может использоваться для диспергирования флотационных реагентов. Правильно подобранные длительность и мощность ультразвукового воздействия могут способствовать повышению адсорбции реагентов (например, собирателей) на поверхности минеральной частицы, а также снижению расхода обработанных ультразвуком реагентов на флотацию.

Кроме того, за счет эффекта акустической кавитации воздействие ультразвука изменяет различные физико-химические характеристики раствора флотационного реагента: размер и количество мицелл и пузырьков, дзета-потенциал, вязкость, а также вспенивающую способность и устойчивость пен, что в свою очередь влияет на эффективность флотации.

В работе [51] коллективом авторов были рассмотрены вопросы увеличения эффективности флотационного реагента (раствора солянокислого амина), применяемого при сильвиновой флотации, за счет диспергирования мицелл реагента с помощью предварительной сонохимической обработки. Было изучено влияние различных режимов акустической мощности (от 168 до 420 Вт с шагом 84) и длительности воздействия (30, 60 и 150 с) ультразвука на физико-химические характеристики системы «минерал – реагент». Результаты показали, что предварительная ультразвуково-

вая обработка реагента уменьшает размер мицелл солянокислого амина, что в свою очередь ведет к увеличению удельной поверхности мицелл собирателя. В связи с чем реагент эффективнее распределяется на поверхности минерала сильвина. Измерены величины угла смачивания частиц КСl после сонохимической обработки и адсорбции на нем амина, подтвердившие повышение гидрофобизации поверхности минерала сильвина. Авторами было обнаружено, что с повышением мощности и длительности ультразвуковой обработки дзета-потенциал раствора реагента становился более электроположительным, тогда как рН раствора понижался. Кроме того, было установлено, что при использовании предварительно обработанного ультразвуком раствора солянокислого амина извлечение КСl повышается по сравнению с применением необработанного ультразвуком реагента.

Также сообщалось [52], что предварительная ультразвуковая обработка различной акустической мощности пенообразующих композиций флотационных реагентов (раствор солянокислого амина, раствор солянокислого амина с добавлением полиэтиленгликоля 200М и раствор солянокислого амина с добавлением триэтиленгликоля) влияет на свойства двухфазных пен: пенообразование, кратность пен, влажность, устойчивость и средняя скорость разрушения пен; а также на изменения поверхностного натяжения пенообразующих композиций реагентов. Авторами было установлено, что ультразвуковая обработка пенообразующих композиций реагентов при акустической мощности 420 Вт увеличивает кратность пен и пенообразование на 10,3 и 12,1% соответственно, при этом пены становятся более «сухими» на 15,2% (в случае раствора солянокислого амина), 15,6% (в случае раствора солянокислого амина с добавлением по-

лиэтиленгликоля 200М) и 13,3% (в случае раствора солянокислого амина с добавлением триэтиленгликоля). Кроме того, наблюдалось повышение стабильности пенного слоя при увеличении акустической мощности ультразвуковой обработки до максимальной (420 Вт) на 63,1% (в случае раствора солянокислого амина), что свидетельствует о возможности регулирования устойчивости и других характеристик пены (пенообразование, кратность и влажность пены) с помощью акустического метода. Было установлено, что ультразвук изменяет вышеуказанные характеристики пены за счет снижения поверхностного натяжения пенообразующих композиций реагентов и уменьшения размера мицелл раствора солянокислого амина.

Кроме того, в работе [53] авторы исследовали влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров шлам (КМЦ и крахмал) на эффективность сильвиновой флотации. Было установлено, что сонохимическая обработка растворов депрессоров уменьшает размер агрегатов молекул крахмала более чем в 133 раза, агрегатов молекул КМЦ — с 6 до 4 нм. 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. Также было 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%. В этой же работе указано, что предварительная сонохимическая обработка депрессоров сильвиновой флотации спо-

способствует увеличению извлечения КС1 и снижению содержания шламов во флотационном концентрате.

Выводы

В статье показано, что ультразвуковая обработка является перспективным процессом повышения эффективности флотации твердых полезных ископаемых. Рассмотрены теоретические основы сонохимии, а также проанализированы эффекты, возникающие при ультразвуковой обработке, включая переходную и стабильную кавитации, эффект силы акустического излучения. Объяснены принципы влияния сонохимического воздействия на эффективность флотации, которые в первую очередь связаны с ультразвуковой кавитацией, возникающей из-за повышения давления в парогазовых зародышах и воздушных пузырьках, а также с силой акустического излучения, которая возникает из-за градиента давления вокруг частицы или пузырька в ультразвуковом поле стоячей волны.

Кроме того, рассмотрено использование ультразвуковой обработки при флотации минеральных руд различными коллективами ученых за последние два десятилетия. Выделено два основных изучаемых направления:

- ультразвуковая обработка пульпы или флотационных реагентов до флотации, при этом рассматривались процессы эмульгирования или диспергирования реагентов, удаление оксидных пленок с поверхности минеральной частицы, обесшламливание под действием ультразвукового поля;
- ультразвуковая обработка в процессе флотации, влияющая на размер пу-

зырьков воздуха, разделение пустой породы от ценного материала, пенообразование и т.д.

Из анализа использованных источников можно сделать несколько важных выводов:

- при интенсификации процессов флотации в основном используют эффект переходной кавитации (низкочастотное излучение), при котором происходит схлопывание парогазовых зародышей и пузырьков. При этом возникают такие явления, как обесшламливание, удаление оксидных пленок с поверхностей минералов и диспергирование реагентов;
- мало изучены эффекты ультразвуковой обработки, возникающие при частотах выше 50 кГц, благодаря которым проявляются стабильная кавитация и сила акустического излучения, влияющие на агрегативную способность пузырьков и твердых частиц;
- наиболее перспективными с точки зрения применения ультразвука на флотационных обогатительных фабриках являются ультразвуковая обработка рудной пульпы, при которой происходит удаление глинисто-солевых шламов и оксидных пленок с поверхности минералов, а также предварительная сонохимическая обработка флотационных реагентов, которая изменяет многие физико-химические характеристики реагентов, тем самым повышая эффективность и экономичность флотационного обогащения твердых полезных ископаемых.

В создании статьи принимал участие д.т.н., профессор кафедры «Химические технологии» В.З. Пойлов (ФГАОУ ВО ПНИПУ) — редактирование рукописи, ценные замечания при создании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А. А.* Пути развития теории обогатительных процессов и создания инновационных технологий комплексного использования сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 1. — С. 165–178.

2. Liu W., Moran C. J., Vink S. A review of the effect of water quality on flotation // *Minerals Engineering*. 2013, vol. 53, pp. 91 – 100. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.07.011.
3. Александрович Х. М., Можейко Ф. Ф., Коршук Э. Ф., Маркин А. Д. Физикохимия селективной флотации калийных солей. — Минск: Наука и техника, 1983. — 272 с.
4. Peleka E. N., Gallois G. P., Matis K. A. A perspective on flotation: a review // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2017, vol. 93, pp. 615 – 623. DOI: 10.1002/jctb.5486.
5. Chen Y., Truong N. T., Bu X., Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020, vol. 60, article 104739. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104739.
6. Mason T. J., Riera E., Vercet A., Lopez-Buesa P., Sun D. Application of ultrasound / Emerging technologies for food processing. Ch. 13. London, Academic Press, 2005, pp. 323 – 351. DOI: 10.1016/B978-0-12-676757-5.X5000-2.
7. Федюшко Ю. М., Федюшко М. П. Экологический характер энергии ультразвуковых волн технологических процессов // *Вестник аграрной науки Дона*. — 2013. — № 4(24). — С. 34 – 39.
8. Videla A. R., Morales R., Saint-Jean T., Gaete L., Vargas Y., Miller J. D. Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery // *Minerals Engineering*. 2016, vol. 99, pp. 89 – 95. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.09.019.
9. Filippov L. O., Filippova I. V., Barres O., Lyubimova T. P., Fattalov O. O. Intensification of the flotation separation of potash ore using ultrasound treatment // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 171, article 107092. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107092.
10. Gungoren C., Baktarhan Y., Demir I., Ozkan S. Enhancement of galena-potassium ethyl xanthate flotation system by low power ultrasound // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 1102 – 1110. DOI: 10.1016/S1003-6326(20)65281-5.
11. Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Хмелев С. С., Цыганок С. Н. Ультразвук. Аппараты и технологии. — Барнаул: АлтГТУ, 2015. — 687 с.
12. Adewuyi Y. G. Sonochemistry: Environmental science and engineering applications // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2001, vol. 40, pp. 4681 – 4715. DOI: 10.1021/ie010096l.
13. Mørch K. A. Reflections on cavitation nuclei in water // *Physics of Fluids*. American Institute of Physics. 2007, vol. 19, no. 7, article 072104. DOI: 10.1063/1.2747210.
14. Кугавская А. А., Любимова Т. П., Рыбкин К. А., Фатталов О. О., Козлов М. В. Экспериментальное исследование возникновения парогазовых пузырьков в воде и растворах солей под действием ультразвука / Пермские гидродинамические научные чтения: Материалы VII Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти профессоров Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова. — Пермь: ПГНИУ, 2020. — С. 253 – 256.
15. Lord Rayleigh O. M. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1917, vol. 34 (200), pp. 94 – 98. DOI: 10.1080/14786440808635681.
16. Plesset M. S. The dynamics of cavitation bubbles // *Journal of Applied Mechanics*. 2021, vol. 16, no. 3, pp. 277 – 282. DOI: 10.1115/1.4009975.
17. Neppiras E. A., Noltingk B. E. Cavitation produced by ultrasonics: Theoretical conditions for the onset of cavitation // *Proceedings of the Physical Society*. Section B. 1951, vol. 64, no. 12, pp. 1032 – 1038. DOI: 10.1088/0370-1301/64/12/302.
18. Маргулис М. А., Маргулис И. М. Динамика ансамбля пузырьков в кавитационном поле // *Журнал физической химии*. — 2007. — № 12 (81). — С. 2290 – 2295.
19. Юр Г. С., Пинясов С. В. Численное исследование процесса кавитации в капле жидкости // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2019. — № 1 – 3. — С. 53 – 56.
20. Neppiras E. A. Acoustic cavitation thresholds and cyclic processes // *Ultrasonics*. 1980, vol. 18, no. 5, pp. 201 – 209. DOI: 10.1016/0041-624X(80)90120-1.

21. Михайлова Н. В., Смирнов И. В., Шарипова А., Слесаренко В. Расчет зависимости звукокапиллярного эффекта от частоты ультразвука на основе критерия пороговой кавитации // Проблемы прочности и пластичности. — 2020. — Т. 82. — № 1. — С. 64–74. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-1-64-74.

22. Yasui K., Lee J., Kozuka T., Towata A., Iida Ya. The range of ambient radius for an active bubble in sonoluminescence and sonochemical reactions // The Journal of Chemical Physics. 2008, vol. 128, no. 18, article 184705. DOI: 10.1063/1.2919119.

23. Young F. R. Cavitation, London, World Scientific, 1999, 444 p.

24. Leighton T. G., Walton A. J., Pickworth M. J. W. Primary Bjerknes forces // European Journal of Physics. 1990, vol. 11, no. 1. DOI: 10.1088/0143-0807/11/1/009.

25. Trujillo F. J., Juliano P., Barbosa-Cánovas G., Knoerzer K. Separation of suspensions and emulsions via ultrasonic standing waves. A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2014, vol. 21, no. 6, pp. 2151–2164. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.02.016.

26. Вахрушев В. В., Рупчева В. А., Пойлов В. З., Косвинцев О. К. Обесшламливание сильвинитовой руды при ультразвуковой обработке // Инженерный вестник Дона. — 2012. — № 4. — С. 1369.

27. Herbert E., Balibar S., Caupin F. Cavitation pressure in water // Physical Review E. 2006, vol. 74, no. 4, article 041603. DOI: 10.1103/PhysRevE.74.041603.

28. Barma S. D., 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, vol. 32, no. 2, pp. 1309–1319. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b03291.

29. Barma S. D. Ultrasonic-assisted coal beneficiation. A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2019, vol. 50, pp. 15–35. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.08.016.

30. Muramatsu H., Saito T. The relationship between bubble motion and particle flocculation pattern under 20-kHz-ultrasound radiation in water // Chemical Engineering Science. 2017, vol. 170, pp. 195–203. DOI: 10.1016/j.ces.2017.03.040.

31. Ozkan S. G. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes // Fuel. 2012, vol. 93, pp. 576–580. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.10.032.

32. Oliveira H., Azevedo A., Rubio J. Nanobubbles generation in a high-rate hydrodynamic cavitation tube // Minerals Engineering. 2018, vol. 116, pp. 32–34. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.10.020.

Литературу с п. 33 по п. 38 и с п. 40 по п. 50 смотри в REFERENCES.

39. Вахрушев В. В., Пойлов В. З., Косвинцев О. К. Удаление хлорида натрия из флотоконцентрата KCl при ультразвуковой обработке // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 322. — № 3. — С. 15–18.

51. Пойлов В. З., Буров В. Е., Галлямов А. Н., Федотова О. А. Сонохимическая активация раствора солянокислого амина, используемого в качестве собирателя в технологии флотации сильвинитовых руд // Обогащение руд. — 2021. — № 5. — С. 15–26. DOI: 10.17580/or.2021.05.04.

52. Burov V. E., Poilov V. Z., Sazhina M. M., Huang Z. Effect of ultrasound on reagent compositions foaming properties used in mineral flotation // Chemchemtech. 2022, vol. 65, no. 9, pp. 81–89. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6624.

53. Буров В. Е., Пойлов В. З., Хуан Ч., Чернышев А. В., Кузьминых К. Г. Влияние предварительной сонохимической обработки депрессоров шламов на эффективность сильвинитовой флотации // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 4. — С. 298–309. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-09. **ТИАБ**

REFERENCES

1. Abramov A. A. Development paths of the theory of beneficiation processes and creation of innovative technologies for integrated use of raw materials. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no. 1, pp. 165–178. [In Russ].

2. Liu W., Moran C. J., Vink S. A review of the effect of water quality on flotation. *Minerals Engineering*. 2013, vol. 53, pp. 91 – 100. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.07.011.
3. Aleksandrovich Kh. M., Mozheyko F. F., Korshuk E. F., Markin A. D. *Fizikokhimiya selektivnoy flotatsii kaliynykh soley* [Physicochemistry of selective flotation of potassium salts], Minsk, Nauka i tekhnika, 1983, 272 p.
4. Peleka E. N., Gallois G. P., Matis K. A. A perspective on flotation: a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2017, vol. 93, pp. 615 – 623. DOI: 10.1002/jctb.5486.
5. Chen Y., Truong N. T., Bu X., Xie G. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020, vol. 60, article 104739. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104739.
6. Mason T. J., Riera E., Vercet A., Lopez-Buesa P., Sun D. Application of ultrasound. *Emerging technologies for food processing*. Ch. 13. London, Academic Press, 2005, pp. 323 – 351. DOI: 10.1016/B978-0-12-676757-5.X5000-2.
7. Fedyushko Yu. M., Fedyushko M. P. The ecological nature of the energy of ultrasonic waves in technological processes. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*. 2013, no. 4(24), pp. 34 – 39. [In Russ].
8. Videla A. R., Morales R., Saint-Jean T., Gaete L., Vargas Y., Miller J. D. Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 99, pp. 89 – 95. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.09.019.
9. Filippov L. O., Filippova I. V., Barres O., Lyubimova T. P., Fattalov O. O. Intensification of the flotation separation of potash ore using ultrasound treatment. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 171, article 107092. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107092.
10. Gungoren C., Bakhtarhan Y., Demir I., Ozkan S. Enhancement of galena-potassium ethyl xanthate flotation system by low power ultrasound. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 1102 – 1110. DOI: 10.1016/S1003-6326(20)65281-5.
11. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Khmelev S. S., Tsyganok S. N. *Ul'trazvuk. Apparaty i tekhnologii* [Ultrasonics. Devices and technologies], Barnaul, AltGTU, 2015, 687 p.
12. Adewuyi Y. G. Sonochemistry: Environmental science and engineering applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2001, vol. 40, pp. 4681 – 4715. DOI: 10.1021/ie010096l.
13. Mørch K. A. Reflections on cavitation nuclei in water. *Physics of Fluids. American Institute of Physics*. 2007, vol. 19, no. 7, article 072104. DOI: 10.1063/1.2747210.
14. Kugaevskaya A. A., Lyubimova T. P., Rybkin K. A., Fattalov O. O., Kozlov M. V. Experimental study of the formation of steam-gas bubbles in water and salt solutions under the influence of ultrasound. *Permskie gidrodinamicheskie nauchnye chteniya: Materialy VII Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy pamyati professorov G.Z. Gershuni, E.M. Zhukhovitskogo i D.V. Lyubimova* [Perm Hydrodynamic Scientific Readings. Materials of 7th All-Russian Conference with International Participation in memory of Professors G.Z. Gershuni, E.M. Zhukhovitsky and D.V. Lyubimov], Perm, PGNIU, 2020, pp. 253 – 256. [In Russ].
15. Lord Rayleigh O. M. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1917, vol. 34 (200), pp. 94 – 98. DOI: 10.1080/14786440808635681.
16. Plesset M. S. The dynamics of cavitation bubbles. *Journal of Applied Mechanics*. 2021, vol. 16, no. 3, pp. 277 – 282. DOI: 10.1115/1.4009975.
17. Neppiras E. A., Noltingk B. E. Cavitation produced by ultrasonics: Theoretical conditions for the onset of cavitation. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1951, vol. 64, no. 12, pp. 1032 – 1038. DOI: 10.1088/0370-1301/64/12/302.
18. Margulis M. A., Margulis I. M. Dynamics of a bubble ensemble in a cavitation field. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 2007, no. 12 (81), pp. 2290 – 2295. [In Russ].
19. Yur G. S., Pinyasov S. V. Numerical study of cavitation process in liquid droplet. *Marine intelligent technologies*. 2019, no. 1 – 3, pp. 53 – 56. [In Russ].
20. Neppiras E. A. Acoustic cavitation thresholds and cyclic processes. *Ultrasonics*. 1980, vol. 18, no. 5, pp. 201 – 209. DOI: 10.1016/0041-624X(80)90120-1.

21. Mikhailova N. V., Smirnov I. V., Sharipova A., Slesarenko V. Calculation of the dependence of the sound-cavitation effect on the ultrasound frequency based on the cavitation threshold criterion. *Problems of strength and plasticity*. 2020, vol. 82, no. 1, pp. 64–74. [In Russ]. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-1-64-74.
22. Yasui K., Lee J., Kozuka T., Towata A., Iida Ya. The range of ambient radius for an active bubble in sonoluminescence and sonochemical reactions. *The Journal of Chemical Physics*. 2008, vol. 128, no. 18, article 184705. DOI: 10.1063/1.2919119.
23. Young F. R. *Cavitation*, London, World Scientific, 1999, 444 p.
24. Leighton T. G., Walton A. J., Pickworth M. J. W. Primary Bjerknes forces. *European Journal of Physics*. 1990, vol. 11, no. 1. DOI: 10.1088/0143-0807/11/1/009.
25. Trujillo F. J., Juliano P., Barbosa-Cánovas G., Knoerzer K. Separation of suspensions and emulsions via ultrasonic standing waves. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014, vol. 21, no. 6, pp. 2151–2164. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2014.02.016.
26. Vakhrushev V. V., Rupcheva V. A., Poylov V. Z., Kosvintsev O. K. Desliming of sylvinite ore by ultrasonic treatment. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2012, no. 4, pp. 1369. [In Russ].
27. Herbert E., Balibar S., Caupin F. Cavitation pressure in water. *Physical Review E*. 2006, vol. 74, no. 4, article 041603. DOI: 10.1103/PhysRevE.74.041603.
28. Barma S. D., 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, vol. 32, no. 2, pp. 1309–1319. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b03291.
29. Barma S. D. Ultrasonic-assisted coal beneficiation. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019, vol. 50, pp. 15–35. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.08.016.
30. Muramatsu H., Saito T. The relationship between bubble motion and particle flocculation pattern under 20-kHz-ultrasound radiation in water. *Chemical Engineering Science*. 2017, vol. 170, pp. 195–203. DOI: 10.1016/j.ces.2017.03.040.
31. Ozkan S. G. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. *Fuel*. 2012, vol. 93, pp. 576–580. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.10.032.
32. Oliveira H., Azevedo A., Rubio J. Nanobubbles generation in a high-rate hydrodynamic cavitation tube. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 116, pp. 32–34. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.10.020.
33. Bruus H. Acoustofluidics 1: Governing equations in microfluidics. *Lab on a Chip*. 2011, vol. 11, no. 22, pp. 3742–3751. DOI: 10.1039/C1LC20658C.
34. Luo X., Cao J., Yin H., Yan H., He L. Droplets banding characteristics of water-in-oil emulsion under ultrasonic standing waves. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018, vol. 41, pp. 319–326. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.09.055.
35. Ambedkar B., Nagarajan R., Jayanti S. Investigation of high-frequency, high-intensity ultrasonics for size reduction and washing of coal in aqueous medium. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2011, vol. 50, no. 23, pp. 13210–13219. DOI: 10.1021/ie200222w.
36. Altun N. E., Hwang J. Y., Hicyilmaz C. Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. *International Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 91, no. 1, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.minpro.2008.10.003.
37. Wang Y., Peng Y., Nicholson T., Lauten R. A. The different effects of bentonite and kaolin on copper flotation. *Applied Clay Science*. 2015, vol. 114, pp. 48–52. DOI: 10.1016/j.clay.2015.05.008.
38. Yu Y., Ma L., Cao M., Liu Q. Slime coatings in froth flotation. A review. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 114, pp. 26–36. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.09.002.
39. Vakhrushev V. V., Poilov V. Z., Kosvintsev O. K. Removal of sodium chloride from KCl flotation concentrate by ultrasonic treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013, vol. 322, no. 3, pp. 15–18. [In Russ].
40. Bandini P., Prestidge C. A., Ralston J. Colloidal iron oxide slime coatings and galena particle flotation. *Minerals Engineering*. 2001, vol. 14, no. 5, pp. 487–497. DOI: 10.1016/S0892-6875(01)00036-X.

41. Xia W., Yang J., Liang C. A short review of improvement in flotation of low rank/oxidized coals by pretreatments. *Powder Technology*. 2013, vol. 237, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.01.017.
42. Xia W., Xie G., Liang C., Yang J. Flotation behavior of different size fractions of fresh and oxidized coals. *Powder Technology*. 2014, vol. 267, pp. 80–85. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.07.017.
43. Misra M., Raichur A. M., Lan A. P. Improved flotation of arsenopyrite by ultrasonic pretreatment. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2003, vol. 20, no. 2, pp. 93–97. DOI: 10.1007/BF03403138.
44. Cao Q., Cheng J., Feng Q., Wen S., Luo B. Surface cleaning and oxidative effects of ultrasonication on the flotation of oxidized pyrite. *Powder Technology*. 2017, vol. 311, pp. 390–397. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.069.
45. Xu M., Xing Y., Gui X., Cao Y., Wang D., Wang L. Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation. *Energy Fuels*. 2017, vol. 31, no. 12, pp. 14367–14373. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b02115.
46. Miettinen T., Ralston J., Fornasiero D. The limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering*. 2010, vol. 23, no. 5, pp. 420–437. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.12.006.
47. Peng Y., Mao Y., Xia W., Li Y. Ultrasonic flotation cleaning of high-ash lignite and its mechanism. *Fuel*. 2018, vol. 220, pp. 558–566. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.02.049.
48. Filippov L. O., Filippova I. V., Barres O., Lyubimova T. P., Fattalov O. O. Intensification of the flotation separation of potash ore using ultrasound treatment. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 171, article 107092. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107092.
49. Najafian L., Ghodsvali A., Haddad Khodaparast M. H., Diosady L. L. Aqueous extraction of virgin olive oil using industrial enzymes. *Food Research International*. 2009, vol. 42, no. 1, pp. 171–175. DOI: 10.1016/j.foodres.2008.10.002.
50. Chen Y., Xie G., Chang J., Grundy J., Liu Q. A study of coal aggregation by standing-wave ultrasound. *Fuel*. 2019, vol. 248, pp. 38–46. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.030.
51. 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, no. 5, pp. 15–26. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.05.04.
52. Burov V. E., Poilov V. Z., Sazhina M. M., Huang Z. Effect of ultrasound on reagent compositions foaming properties used in mineral flotation. *Chemchemtech*. 2022, vol. 65, no. 9, pp. 81–89. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6624.
53. Burov V. E., Poilov V. Z., Huang Z., Chernyshev A. V., Kuzminykh K. G. Effect of sonochemical pretreatment of slurry depressors on sylvinitic flotation performance. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 4, pp. 298–309. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-09.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Буров Владимир Евгеньевич – аспирант,
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет,
e-mail: vladimire.burov@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-0369-0492.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

V.E. Burov, Graduate Student, Perm National Research
Polytechnic University, 614990, Perm, Russia,
e-mail: vladimire.burov@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-0369-0492.

Получена редакцией 17.03.2023; получена после рецензии 06.07.2023; принята к печати 10.12.2023.
Received by the editors 17.03.2023; received after the review 06.07.2023; accepted for printing 10.12.2023.