

УДК 622.7:534

Г.Г. ГУБИН, канд. техн. наук,

Т.П. ЯРОШ, канд. техн. наук,

Л.В. СКЛЯР, канд. техн. наук

(Украина, Кривой Рог, Государственное ВУЗ "Криворожский национальный университет")

ОБОБЩЕНИЕ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Во второй половине прошлого столетия научно-исследовательские организации и промышленные предприятия в своих научных и практических работах обратились к использованию ультразвука [1-6].

Ультразвуковые колебания представляют собой упругие волны, распространяющиеся с определенной скоростью в жидкости, газах и твердых телах. Появление таких волн связано с тем, что при смещении под действием внешней среды какой-либо точки упругой среды возникают упругие силы, старающиеся вернуть эту точку в положение равновесия. Колеблющийся источник звука периодически сближает примыкающие к нему частицы среды, которые передают это сжатие следующему слою, и волны сжатия, чередуясь с волнами разрежения, проходят все пространство, которое занимает эта среда. Стойкость и направление распространения волн зависит от плотности и упругости среды, а также от ее размеров.

Частотный диапазон упругих волн широк: от долей герца (инфразвук) до 10^{13} Гц, т.е. до частоты, при которой длина ультразвуковой волны сравнима с межмолекулярным расстоянием в твердых телах и жидкостях. Нижней границей ультразвука считают обычно частоту 18 кГц.

В отличие от слышимых звуковых колебаний (от 16 Гц до 20 кГц) ультразвук может быть носителем высоких энергий. Значение этого свойства ультразвука усиливается еще тем, что колебания ультразвука преломляются и отражаются в соответствии с законами оптики, на чем основана их концентрация. Особенности высокоэнергетических ультразвуковых колебаний является возможность фокусирования значительной энергии на сравнительно небольшую площадь рабочей зоны.

Условия излучения упругих колебаний звукового и ультразвукового диапазона частот в жидкость более благоприятны, чем в газовую среду. Акустическое сопротивление жидкости, например воды, в 3500 раз больше, чем воздуха, поэтому при данной величине колебательной скорости общая акустическая мощность излучателя будет значительно большей для жидкости, чем газовых сред. Это стало причиной того, что ультразвук наиболее успешно стали использовать в технологиях, протекающих в жидких средах.

Под действием ультразвука в жидкой среде происходят физические, хими-

ческие и физико-химические процессы. Это кавитация, радиационное давление и акустические потоки.

Процесс кавитации связан с тем, что все жидкости очень чувствительны к растягивающим усилиям. Под влиянием мощных ультразвуковых колебаний в жидкости возникают зоны сжатия и разрежения. При прохождении фазы волны, создающей разрежение, в жидкости образуется большое количество разрывов в виде кавитационных пузырьков, которые в следующей фазе сжатия резко захлопываются. При этом давление газа в парогазовой смеси достигает 3000 атм, а температура – 6000 °К. Газ, сжатый в микрообъеме полости в момент захлопывания, стремительно расширяется, и в жидкости возникает ударная волна, подобная точечному взрыву [7-9].

Под действием кавитации в воде образуются ионы H^+ и OH^- , озон, перекись водорода, а при наличии в воде растворенного азота – азотная и азотистые кислоты. На поверхности кавитационных пузырьков появляются электрические заряды, внутри пузырьков происходят электрические пробой, приводящие к ионизации паров жидкости и газов [10].

Кавитационные процессы интенсифицируют процессы очистки поверхности рудных частиц от пленок и налипших загрязнений, повышают скорость диффузии жидкой части пульпы в поры и трещины, образующиеся на поверхности минеральных пленок благодаря их кавитационному разрушению, ускоряют процессы дезинтеграции и диспергирования минералов, эмульгирования флотореагентов и деструкции адсорбционных слоев реагентов, находящихся на поверхности частиц концентратов [11].

В случае большой интенсивности ультразвука в акустическом поле появляется радиационное давление, величина которого на порядки ниже амплитуды звукового давления. Однако иногда (гидроабразивное разрушение поверхности минеральных частиц в пульпе, образование эмульсий флотореагентов и др.) такого рода давление может играть значительную роль.

Кроме того, под воздействием мощного ультразвука в жидкой среде возникают акустические потоки, которые интенсивно перемешивают пульпу, уменьшают толщину ламинарного слоя у границы с твердым телом и способствуют устранению диффузионных ограничений. Этот процесс играет большую роль при ультразвуковой очистке поверхности рудных частиц от загрязнений минерального характера [12].

Установки для ультразвуковой очистки твердых материалов работают обычно с частотой в пределах 20-40 кГц, такой диапазон является оптимальным для различных видов ультразвуковой очистки.

Интенсивность ультразвуковых колебаний обычно составляет 0,5-5 Вт/см². Повышение статического давления при определенных соотношениях с акустической мощностью значительно повышает эффективность очистки.

При переработке полезных ископаемых ультразвуковые колебания используются для разрушения минерального вещества и поверхностных пленок (при измельчении и дезинтеграции минералов), интенсификации процесса магнитной

сепарации, флотации, обезвоживания и сушки продуктов обогащения. Рассмотрим некоторые примеры применения ультразвука при обработке минерального сырья.

Использование ультразвука для измельчения и диспергирования минералов считается особенно перспективным тогда, когда необходимо получать небольшие количества материала высокой дисперсности или измельчать дорогостоящие продукты. Процесс ультразвукового измельчения минералов происходит в основном за счет кавитационной эрозии [8]. У минералов с одинаковой кавитационной прочностью процесс дезинтеграции происходит вследствие расклинивающего действия кавитационных пузырьков, попадающих в трещины минералов. Эффективность разрушающего воздействия ультразвука на твердые частицы в водной среде зависит от ряда факторов: свойства жидкости, температуры, внешнего давления, интенсивности и частоты ультразвука, длительности обработки, твердости, однородности и пористости частиц, их химической стойкости и др. [13]. Диспергирующее действие ультразвука наиболее эффективно при киллогерцевых частотах, т.к. в низкочастотном ультразвуковом поле кавитация возникает при значительно меньшей интенсивности ультразвука.

Различие в действии ультразвука на отдельные минералы было успешно использовано в ряде работ. Например, установлена возможность измельчения минералов слоистой структуры (графит, молибденит) до высокой степени дисперсности. Процесс измельчения молибденита в условиях избыточного статического давления позволяет за одно и то же время получить продукт, дисперсность которого в 2-3 раза выше дисперсности продукта, получаемого при атмосферном давлении [11].

Своеобразие физических и физико-механических свойств воды, обуславливающих ее активную роль во многих обогатительных процессах, объясняет интерес ученых к исследованию свойств воды. Ажурность воды и ее тетраэдрическая структура были изучены Я.И. Френкелем и Б.В. Дерягиным.

При флотации минералов в воде, предварительно обработанной ультразвуком, повышается извлечение минералов в пенный продукт по сравнению с флотацией без предварительной обработки воды [14].

В ВИМСе исследовали воздействие ультразвука на минералы титаноциркониевых месторождений. Было установлено, что обработка в течение 1-3 минут при частоте колебаний 20 кГц и интенсивности 3,8 Вт/см² резко активизирует флотацию минералов [15]. Выход минералов в пенный продукт увеличился: циркона с 18,6 до 98,9%, рутила с 3,0 до 97,5%, ильменита с 0 до 94%, ставролита с 0 до 90%. Одновременно с этим расход собирателя снижался в 3-15 раз. После ультразвуковой обработки сближаются флотационные свойства одноименных минералов различных месторождений, а также различных участков одного и того же месторождения.

Изучался процесс ультразвукового кондиционирования воздушных пузырьков. Установлено, что под влиянием ультразвука небольшие пузырьки растут быстрее, так как в звуковом поле вследствие колебаний пузырьков возникает

акустический эффект, ускоряющий массопередачу. Выросшие пузырьки, обладая большей плавучестью, быстрее поднимаются к поверхности. Применение ультразвукового кондиционирования воздушных пузырьков позволяет увеличить извлечение минералов и повысить чистоту концентратов. Характерным является невысокая интенсивность ультразвука и кратковременность ультразвуковой обработки, которые обеспечивают значительный технологический эффект.

В практике флотационного обогащения применяются нерастворимые и труднорастворимые в воде аполярные реагенты, эффективность использования которых зависит от их подготовки к флотации. Исследования по эмульгированию реагентов с помощью ультразвуковых колебаний проведены Р.В. Вудом, В. Петерсеном, О.Д. Кирилловым и другими учеными. Установлено, что при продолжительной обработке эмульсий ультразвуковыми колебаниями их устойчивость снижается.

Влияние эмульгированных аполярных реагентов на эффективность их действия при флотации различных минералов изучалось В.А. Глембоцким и А.А. Байшулаковым [16]. Результаты интересны тем, что обработка реагентов в акустических, а затем в магнитных полях позволяет сократить расход реагентов. Применение эмульгированных ультразвуком углеводородных масел было осуществлено в промышленных условиях при флотации медных руд Джекказгана Балхашской обогатительной фабрики [17].

Изучено воздействие акустических колебаний на процесс разрушения пен. На практике флотационного обогащения устойчивые пены переливаются через борта желобов флотомашин, плохо перекачиваются насосами и увеличивают потери металлов в сливах сгустителей. Влияние воздействия акустических колебаний на процесс разрушения пены оценивали по скорости самопроизвольного разрушения пены и по скорости разрушения при обработке акустическими колебаниями. Установлено, что эффективное разрушение флотационных пен происходит при использовании акустических преобразователей, генерирующих высокочастотные колебания в газовой среде. На Березовской обогатительной фабрике по переработке полиметаллических руд были проведены промышленные испытания и внедрен акустический метод разрушения флотационных пен медного и цинкового концентратов, что позволило избежать нежелательного обводнения медного концентрата и перестроить схему обезвоживания [18].

При наличии в суспензиях тонкодисперсных частиц (менее 20 мкм) процессы сгущения протекают медленно. Ускорить их возможно путем агрегации частиц с помощью реагентов – коагулянтов и флокулянтов. К числу перспективных методов следует отнести коагуляцию суспензий под воздействием ультразвуковых колебаний. Коагулирующее действие ультразвука на угольных частицах отмечается в работе [19]. С помощью ультразвуковых колебаний в жидкости отфильтровывали тонкие фракции материала [20]. В результате исследований на суспензиях кварца, графита, сфалерита для процесса коагуляции установлена оптимальная область повышенных ультразвуковых частот (1000-3000 кГц).

Ультразвуковые колебания могут использоваться для дешламации минеральных суспензий. Известны конструкции ультразвуковых центрифуги и гидроциклона, в которых благодаря одновременному действию центробежных сил и ультразвукового поля удается полностью выделить из суспензии все мелкодисперсные частицы [21].

Механизм воздействия акустических колебаний на процесс фильтрования продуктов обогащения изучен недостаточно. Есть данные по применению акустического фильтрования для разделения очень вязких технических суспензий.

На ряде флотационных обогатительных фабрик в качестве заключительной технологической операции используют сушку. Применение энергии акустических колебаний для ускорения теплообмена дает возможность интенсификации этого процесса. При исследовании кинетики сушки было установлено, что на процесс удаления влаги из материала влияет уровень звукового давления. При максимальном уровне звукового давления (170 дБ) влажность материала снижается с 14,9 до 11,2% после трехминутной обработки, до 9% – после пятиминутной и до 4% – после десятиминутной обработки [11].

Одним из перспективных направлений применения ультразвука в обогащении полезных ископаемых является использование его для очистки получаемых продуктов от поверхностных минеральных покрытий в виде пленок или вторичных образований, прочность связи которых с поверхностью выделяемых частиц бывает такой, что обычными методами удалить их не удастся. Данная проблема имеет место и при производстве железорудных концентратов на горно-обогатительных комбинатах Кривого Рога [22].

Ю.Л. Грицай объясняет снижение содержания железа в магнетитовом концентрате закреплением частиц рудных минералов на поверхности кварца [23]. При этом необходимо отметить следующее:

- в процессе измельчения происходит закрепление на поверхности зерен кварца частиц гематита, мартита, гидроксидов железа и магнетита размером не более 0,8 мкм;
- прочность закрепления минералов зависит от усилий, приводящих их в контакт, и типа минералов;
- закрепившиеся минеральные частицы не удаляются полностью с поверхности кварца ни интенсивной промывкой, ни механической оттиркой;
- удалить с поверхности кварцевых зерен закрепившиеся частицы оксидов железа удалось только с помощью обработки пульпы ультразвуком.

Л.Х. Ковальчук, изучая под электронным микроскопом поверхность частиц магнетита до и после магнитной сепарации, пришел к выводу, что силикаты и кварц налипают на магнетитовые зерна. Поверхность магнетита на 20-30% покрыта частицами других минералов размером 2-3 мкм. При удалении таких частиц с поверхности зерен магнетита при помощи ультразвука даже у высококачественных концентратов с массовой долей железа 67-68% качество повысилось на 0,7-1%.

В институте "Уралмеханобр" изучали очистку стекольных песков, полево-

го шпата, искусственных абразивных материалов и других продуктов от поверхностных покрытий и пленок вторичных минеральных образований. Обработку поверхности минералов в ультразвуковом поле осуществляли как в водной среде, так и с использованием активных добавок, способных растворять удаляемые с поверхности частицы вредные примеси. Использовали ультразвук частотой 15-25 кГц и интенсивностью не менее 2 Вт/см². Продолжительность обработки ультразвуком колебалась в пределах 5-15 мин, а в некоторых случаях снижалась до 1-13 мин. В этом же институте были сконструированы полупромышленные установки для непрерывной ультразвуковой обработки минеральных пульп, с помощью которой можно обрабатывать пульпу с крупностью твердых частиц, не превышающей 50 мкм (рис. 1) [24].

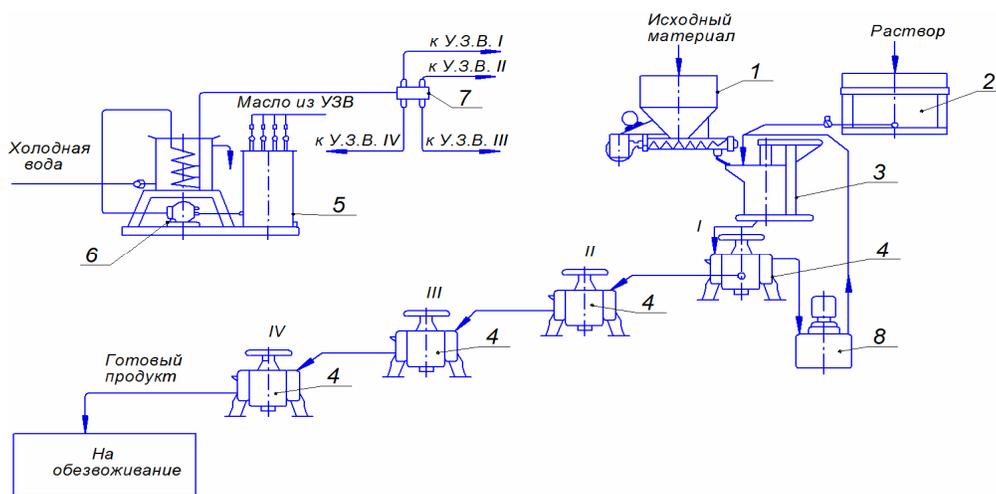


Рис. 1. Схема цепи аппаратов для ультразвуковой обработки тонкоизмельченных материалов:

- 1 – бункер с питателем; 2 – бачок для растворителя; 3 – реактор;
 4 – ультразвуковые ванны (I, II, III, IV); 5 – теплообменник; 6 – насос ШДП-12;
 7 – коллектор; 8 – насос

Исходный материал загружали в бункер 1, откуда питателем он подавался в реактор. Туда же заливали растворитель заданной концентрации в таком количестве, чтобы плотность пульпы поддерживалась в пределах Т:Ж = 1:1 – 2:1. Из реактора 3 пульпа направлялась в ванну первичной стадии ультразвуковой обработки. Ультразвуковая ванна 4 смонтирована в виде цилиндрического сосуда с мешалкой, служащей для поддержания пульпы во взвешенном состоянии, что создавало равномерное распределение твердых частиц в объеме пульпы и улучшало ультразвуковую обработку поверхности зерен. Магнитострикционный преобразователь типа ПМС-6 отделен от пульпы дном ванны и слоем минерального масла, которое непрерывно охлаждалось в теплообменнике 5. Пульпа после ее обработки ультразвуком в течение определенного времени поступала самотеком во вторую, третью и четвертую ванны, а затем направлялась на промывку, дешламацию и, если необходимо, – на классификацию.

Спеціальні та комбіновані методи

Техническая характеристика установки:

Производительность	200-240 кг/час
Крупность материала	40 мкм
Отношение Т:Ж	1:1-2:1
Количество преобразователей типа ПМС-6	4
Габариты установки	3650×2100×1850 мм
Общая масса	2500 кг

С помощью данной установки производили ультразвуковую очистку кварцевых стекольных песков от гидроксидов железа. Обычно железосодержащие пленки удалялись механической оттиркой, но этот способ не обеспечивал необходимого удаления гидроксидов железа. Кроме того, механическая оттирка продолжалась 30-60 мин. Ю.Г. Дмитриев изучал воздействие ультразвука разных частот и интенсивностей на качество очистки кварцевых песков от гидроксидов железа и определил, что наилучшие результаты (рис. 2 и 3) получаются при частоте около 20 кГц, причем с повышением интенсивности ультразвука качество очистки резко возрастает.

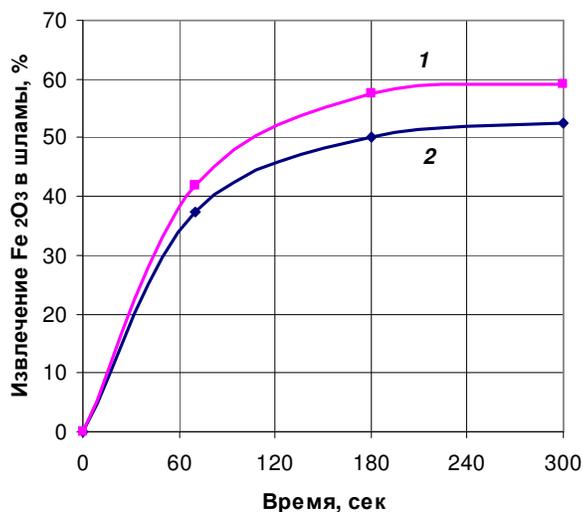


Рис. 2. Зависимость извлечения Fe_2O_3 в шламы от частоты ультразвукового поля, кГц:
1 – 20; 2 – 800

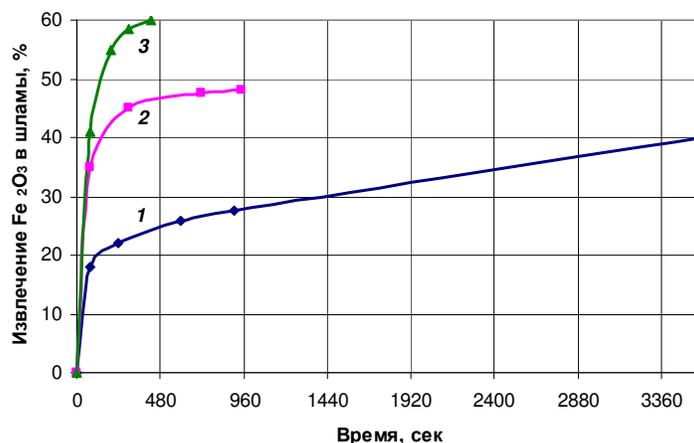


Рис. 3. Влияние интенсивности ультразвукового поля частотой 20 кГц на продолжительность обработки, Вт/см²:
1 – 0; 2 – 8; 3 – 18

Ультразвуковая обработка в сочетании с добавкой в пульпу небольших количеств соды и жидкого стекла позволяла уменьшить длительность очистки до 2-5 мин и повысить удаление гидроксидов [25].

В Механобрчермете изучали возможность использования ультразвуковой обработки пульпы для интенсификации процесса магнитной сепарации окисленных кварцитов [26]. Исследования выполнялись на исходной окисленной руде Валявкинского месторождения Кривбасса, а также шламах и песках обесшламливающего конуса. Для экспериментов использовали ультразвуковой генератор типа УЗДН, частота генератора изменялась ступенчато: 15, 22, 35 кГц, время обработки ультразвуком от 30 до 120 секунд.

Установлено, что в результате ультразвуковой обработки исходной руды крупностью 95% класса минус 0,05 мм содержание железа в концентрате магнитной сепарации повысилось с 49,3 (без обработки) до 54,5%; при обработке ультразвуком шламов этот показатель повышался с 50,6 до 59,9%, а при обработке песков возрастал с 45,8 до 50,1%. Во всех случаях уровень извлечения оставался постоянным или снижался незначительно. Увеличение частоты ультразвука от 15 до 35 кГц способствовало некоторому повышению эффективности разделения.

При последующих исследованиях ультразвуковую обработку материала осуществляли перед селективной флокуляцией, предшествовавшей мокрой магнитной сепарации в сильном магнитном поле. Флокуляцию проводили при добавке полиакриламида (ПАА) 10 г/т. При обработке ультразвуком исходного питания извлечение железа в концентрат стало выше на 8,5% и на 7% – при обработке шламов конуса при неизменном качестве в обоих случаях. Эффективность обогащения и в том и другом экспериментах повышалась на 20 и 21% соответственно по сравнению с магнитной сепарацией без селективной флокуляции и обработки пульпы ультразвуком (рис. 4).

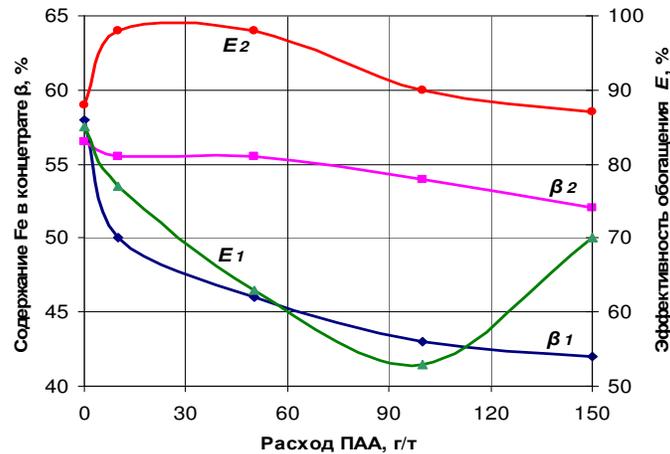


Рис. 4. Зависимость показателей обогащения шламов из руды Валявкинского месторождения от расхода полиакриламида без обработки (β_1 и E_1) и после обработки ультразвуком (β_2 и E_2)

После ультразвуковой обработки шламов конуса с массовой долей железа 39,7% и их селективной флокуляции получали концентрат, содержащий 59,8% Fe. Повторная обработка ультразвуком магнитного продукта перед вторым приемом магнитного обогащения приводила к получению концентрата с 63,0% Fe при выходе 40% и извлечении железа 63,5% от исходного шлама (рис. 5).

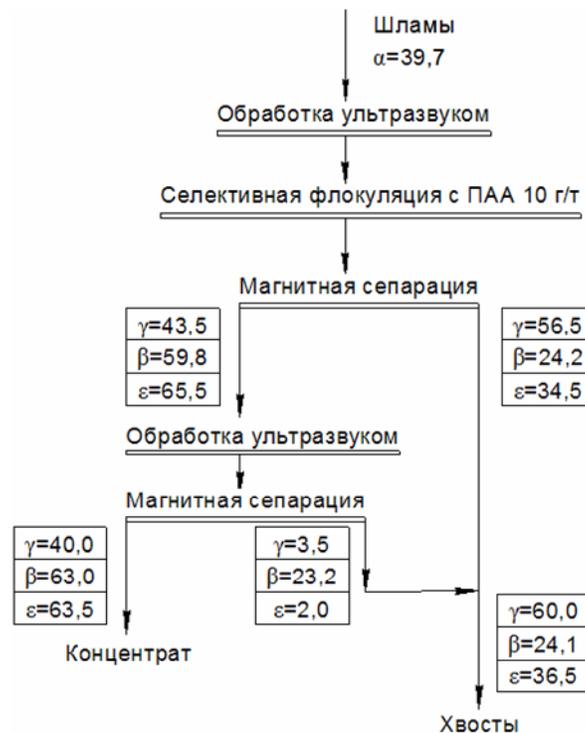


Рис. 5. Схема магнитного обогащения шламов конуса руды Валявкинского месторождения с применением предварительной обработки их ультразвуком

Авторы приходят к выводу, что применение ультразвука перед магнитной сепарацией в сильном поле более эффективно для тонкоизмельченной руды и шламов и нецелесообразно для песков или руды грубого помола.

Процесс образования так называемых искусственных или техногенных сростков связан с возникновением в измельчительных, обогатительных и классифицирующих аппаратах комбинации различных силовых полей, создающих условия для интенсивного взаимодействия поверхностей минералов. Такие покрытия поверхностей для крупных зерен (> 10-20 мкм) следует отнести к классу "пленочных" покрытий, механизм образования которых связан в основном с наличием на поверхности частиц ионноэлектростатических и молекулярных полей. О необходимости учета при анализе этого явления физико-химических свойств минералов и жидкой фазы суспензии свидетельствуют результаты исследований по применению механической оттирки поверхностей минеральных частиц магнетитовых суспензий перед магнитной сепарацией. Наилучшие результаты разделения получены при использовании полиэлектролитов. Качество концентратов ГОКов Кривого Рога повышалось на 2,6-3,8% при одновременном снижении содержания железа в хвостах сепарации с 17,1-28,6 до 10,8-19,2%. Обработка электролитами повышала извлечение на 0,22-0,34% по сравнению с обычной технологией [27].

В Криворожском национальном университете изучены промпродукты обогащения ПАО "ЦГОК" и ПАО "СевГОК" [28]. В таблице приведены результаты распределения $Fe_{общ}$ по классам крупности продуктов I и V стадий магнитного обогащения ПАО "ЦГОК".

Выход классов и распределение $Fe_{общ}$ в магнитных продуктах
ПАО "ЦГОК" по стадиям обогащения

Класс крупности, мм	I-я стадия			V-я стадия		
	Выход, %	Массовая доля $Fe_{общ}$, %	Извлечение $Fe_{общ}$, %	Выход, %	Массовая доля $Fe_{общ}$, %	Извлечение $Fe_{общ}$, %
+0,25	23,8/23,5	27,5/27,9	13,0/13,1	–	–	–
-0,25+0,10	14,6/14,0	47,3/48,5	13,5/13,7	1,7	37,9/38,2	0,96
-0,10+0,071	9,5/8,9	58,8/61,3	10,9/11,0	6,2/6,1	53,4/54,6	4,9/5,0
-0,071+0,05	7,9/7,4	61,5/64,2	9,5/9,6	5,8/5,6	62,8/63,3	5,4/5,3
-0,05+0,02	34,4/33,6	63,7/67,8	43,4/45,1	73,5/73,5	70,0/71,1	76,4/77,6
-0,02*	9,8/12,6	48,3/33,6	9,4/8,4	12,8/13,1	64,7/57,5	12,3/11,2
Всего	100	50,6	100	100	67,3	100

* – расчетное значение по материальному балансу.

23,8/23,5 – соответственно выход, массовая доля $Fe_{общ}$, извлечение $Fe_{общ}$ до и после ультразвукового воздействия (УЗВ).

Наличие и прочность закрепления шламовых покрытий на частицах оценивались по изменению массовой доли $Fe_{общ}$ в классах крупности. Продукты подвергались интенсивному ультразвуковому воздействию (УЗВ). Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что в различных классах промпро-

дуктов магнитного обогащения изменялась массовая доля общего железа после УЗВ: содержание $Fe_{\text{общ}}$ повышалось на 2,7-4,1% в классах крупности, в которых концентрировались раскрытые зерна минералов (-0,071 мм), а в шламовых продуктах (-0,02 мм) снижалось на 14,7 и 7,2% для промпродуктов I и V стадий обогащения соответственно. Это свидетельствовало скорее о превалировании очистки поверхности частиц от шламовых покрытий над освобождением нерудных минералов из магнитных флокул.

Достигнутое качество железорудных концентратов связано с удалением микронных техногенных образований как с частиц оксидов железа, так и с частиц кварца и силикатов. Эффективность ультразвуковой обработки связана с обновлением поверхностей частиц, что приводит к увеличению контрастности магнитных и флотационных свойств минералов.

Таким образом, анализ литературных источников показал эффективность применения ультразвука для интенсификации процессов и решения отдельных технологических задач в обогащении полезных ископаемых. Диапазон использования высокоэнергетического ультразвука велик и его возможности далеко не реализованы. Учитывая реалии настоящего времени, наступило время вновь вернуться к применению ультразвука в обогащении железных руд. Перспективность использования акустических методов открывает возможности эффективной модернизации технологий обогащения.

Список литературы

1. Мельников Г.С. Использование ультразвука при обогащении полезных ископаемых // Обогащение и брикетирование углей. – 1958. – Вып. 8.
2. Якубович И.А. Физические основы использования ультразвука для интенсификации обогатительных процессов // Применение ультразвука для интенсификации процессов обогащения и минералогического анализа: Тр. ВИМСа. – 1971. – Вып. 17.
3. Хавский Н.Н., Смирнов Ю.Р., Бершицкий А.Н. Современное состояние использования ультразвука в процессах обогащения и гидрометаллургии цветных металлов. – М.: Цветметинформация, 1971.
4. Кац М.Я., Шутов В.Д. Исследование ультразвука для диспергирования и дезинтеграции минералогических сред // Доклады Всесоюзной конференции по ультразвуку. Секция "Использование ультразвука в химико-технологических процессах". – М.: ЦИНТИ ЭП, 1960.
5. Келлер О.К., Картыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.
6. Маташек И. Ультразвуковая техника. – М.: Metallurgizdat, 1962.
7. Розенберг Л.Д. Фокусирующие излучатели ультразвука. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука. Т. 1. Источники мощного ультразвука. – М.: Наука, 1967.
8. Агранат Б.А., Башкиров В.И. Критерий оценки интенсивности ультразвуковой кавитации. "Доклады АН СССР", 1968, 179, № 4.
9. Розенберг Л.Д. Энергетические соотношения при ультразвуковой кавитации. В сб.: "Ультразвуковая техника", вып. 6. – М.: НИИмаш, 1964.
10. Носов В.А. Ультразвук в химической промышленности. – К.: Гостехиздат УССР, 1963.
11. Ультразвук в обогащении полезных ископаемых / В.А. Глембоцкий, М.А.Соколов, И.А. Якубович и др. – Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1972. – 229 с.

12. Ультразвук в гідрометалургії / Б.А. Агранат, О.Д. Кириллов, Н.А. Преображенский и др. – М.: Металлургия, 1969.
13. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Бронин Ф.А. Приближенные методы вычисления критерия эрозионной активности и выбор оптимальных режимов ультразвуковой технологии // Интенсификация процессов извлечения металлов из руд в ультразвуковом поле. – М.: Металлургия, 1969.
14. Агранат Б.А., Хавский Н.Н., Хан Г.А., Пантелеева Н.Ф., Эльберт А.В. Флотация в воде, обработанной ультразвуком // Интенсификация процессов извлечения металлов из руд в ультразвуковом поле". – М.: Металлургия, 1969.
15. Изменение флотационных свойств минералов россыпей с помощью ультразвука / К.С. Аكوпова, И.Д. Докшина, Н.Д. Тютюнник и др. // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов. – М.: Металлургия, 1970.
16. Байшулаков А.А., Глембоцкий В.А., Соколов М.А. Эмульгирование реагентов ультразвуком в присутствии стабилизаторов // Вестник АН КазССР. – 1962. – №1.
17. Лифшиц А.К., Кузькин А.С. Усовершенствование режима и схемы флотации Джезгазганской медной сульфидной руды с применением углеводородных масел // Сб. науч. тр. ин-та Гипроцвет. – 1962.
18. Байшулаков А.А., Соколов М.А., Малахов Ю.В. Ультразвуковое пеногашение на обогатительных фабриках. – М.: Цветметинформация. – 1967.
19. Каменев Н.И. Исследование интенсификации процесса флотации угля ультразвуком и эмульгирование реагентов: Автореф. дисс.– 1964.
20. Ермилов А.С., Волобуев Н.К. Фильтрация тонких суспензий с помощью акустических колебаний // Применение ультраакустики к исследованию вещества – М.: МОПИ, 1962. – Вып. 14.
21. Фридман В.М. Ультразвуковой гидроциклон: Авт. свид-во №182112. – Бюлл. изобр. – 1966. – №11.
22. Губин Г.Г., Губина В.Г. Возможности улучшения качества железорудных концентратов на ГОКах Кривбасса // Горный журнал. – 2001. – № 1. – С. 45-47.
23. Исследование по закреплению дисперсных рудных минералов на поверхности кварца при измельчении железистых кварцитов / Ю.Л. Грицай, М.В. Педан, З.Д. Герасимова и др. // Обогащение руд черных металлов. – М.: Недра, 1980. – Вып. 9. – С. 3-9.
24. Ревнивцев В.И. Обогащение полевых шпатов и кварца. – М.: Недра, 1970.
25. Дмитриев Ю.Г. Изучение некоторых закономерностей процесса ультразвуковой очистки минералов: Автореферат дисс. – Свердловск, 1967.
26. Богданова И.П., Грицай Ю.Л., Удовенко Р.Г. Применение ультразвуковой обработки пульпы для интенсификации процесса магнитной сепарации окисленных кварцитов // Минчермет СССР. Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований черной металлургии. Экспресс-информация. Серия 2. – 1977. – Вып. № 4. – С. 18-22.
27. Пилов П.И. Повышение качества магнетитовых концентратов путем их механической обработки // Горный журнал. – 1999. – №6. – С. 30-32.
28. Губин Г.В., Ткач В.В., Орел Т.В., Плотников В.В. Особенности загрязнения поверхностей минералов в процессе измельчения // Вісник Криворізького технічного університету. – 2005. – №7. – С. 77-82.

© Губин Г.Г., Ярош Т.П., Скляр Л.В., 2016

*Надійшла до редколегії 21.03.2016 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Т.А. Олійник*