

Инженерно-геологическое обоснование технологии глубокого обезвоживания отходов обогащения железных руд

Д.С. Куренков✉

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉kurenkov@misis.ru

Резюме: Представлена возможность применения вибрационных технологий для глубокого обезвоживания отходов обогащения руд железистых кварцитов. Приведены основные показатели физико-механических свойств, химического и минерального составов исследованных хвостов, позволившие предложить аппарат для обезвоживания, обосновать выбор фильтровальных элементов и размер ячеек фильтров. Показана возможность эффективного разделения воды и твердой фазы хвостов при воздействии колебаний в частотном диапазоне от 7 до 15 Гц, амплитуде колебательной скорости, равной 0,07–0,09 м/с, и перепаде давления на фильтре 0,05 МПа. Предлагаемые решения по глубокому обезвоживанию хвостов руд железистых кварцитов позволяют существенно повысить уровень промышленной и экологической безопасности при их складировании на земной поверхности в хранилища за счет снижения водонасыщенности техногенных отложений и ограждающих дамб формируемых техногенных массивов. Внедрение в производство (на примере АО «Карельский окатыш») предлагаемых технологических решений по глубокому обезвоживанию отходов обогащения железистых кварцитов позволяет ежегодно обрабатывать до 65% поступающих в хранилище хвостов.

Ключевые слова: вибрационные технологии, обезвоживание пульпы, железистые кварциты, хвостохранилища, техногенные массивы, промышленная безопасность, экологическая безопасность, хвосты мокрой магнитной сепарации, свойства хвостов

Для цитирования: Куренков Д.С. Инженерно-геологическое обоснование технологии глубокого обезвоживания отходов обогащения железных руд. *Горная промышленность*. 2023;(1):57–62. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-57-62>

Engineering and geological justification of deep dehydration technology for iron ore processing waste

D.S. Kurenkov✉

NUST MISIS, Moscow, Russian Federation

✉kurenkov@misis.ru

Abstract: The paper presents the possibility to apply vibration technology for deep dehydration of processing wastes of ferruginous quartzite ores. The basic indicators of physical and mechanical properties, chemical and mineral composition of the investigated tailings are provided, which allowed to propose a device for dehydration and to justify the choice of filtering elements and the size of filter cells. The possibility of efficient separation of water and the solid phase of tailings was shown due to the effect of vibrations in the frequency range of 7 to 15 Hz, the amplitude of the vibration velocity of 0.07–0.09 m/s and the pressure drop of 0.05 MPa on the filter. The proposed solutions for deep dehydration of ferruginous quartzite tailings help to significantly enhance the level of industrial and environmental safety of their storage on the ground surface by reducing water saturation of the man-made deposits and enclosing dikes of the created man-made rock masses. Implementation of the proposed technological solutions for deep dehydration of ferruginous quartzite processing wastes into production (as exemplified by 'Karelskiy Okatysh' JSC) makes it possible to treat up to 65% of the incoming tailings annually.

Keywords: vibration technology, pulp dehydration, ferruginous quartzite, tailings, man-made rock masses, industrial safety, environmental safety, tailings of wet magnetic separation, properties of tailings

For citation: Kurenkov D.S. Engineering and geological justification of deep dehydration technology for iron ore processing waste. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):57–62. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-57-62>

Введение

Рост численности населения Земли и интенсификация его хозяйственной деятельности сопровождаются увеличением количества образующихся отходов и продуктов техносферы. В настоящее время их годовые объемы неуклонно растут и превысили отметку 100 млрд т при долевом участии РФ около 8,5 млрд т, при этом на обогатитель-

ные производственные процессы приходится до 1 млрд т хвостов. Дальнейший рост объемов добычи минеральных ресурсов на фоне возросших экологических требований к недропользованию вызывает необходимость рационального подхода к размещению на земной поверхности отходов производств в специальные горнотехнические сооружения, в частности, полностью или частично во-

донасыщенные, так как аварии на них сопровождаются обычно серьезными экологическими и экономическими последствиями [1–5]. Данные обстоятельства предъявляют к объектам размещения отходов требование обеспечения безопасности их строительства и эксплуатации.

Преимущественно при размещении отходов обогательных производств используются традиционные технологии гидроотвалообразования, когда хвосты размещаются в сформированные емкости намывного сооружения в виде пульпы – смеси минеральных частиц с водой. Это приводит к формированию во внутренних зонах мощной толщи водонасыщенных тонкодисперсных уплотненных пород, специфической особенностью которых является наличие избыточного порового давления, существенно снижающего их прочностные свойства, и сказывающееся на устойчивости откосов. В последние годы на обогательных фабриках различных производств стали использоваться технологии предварительного обезвоживания хвостов до состояния кека – твердого осадка с содержанием 12–18% жидкости – с последующим формированием объектов размещения так называемым сухим способом с применением автомобильной и бульдозерной техники. Целью складирования сгущенных и глубоко обезвоженных хвостов является снижение водонасыщенности техногенных отложений и ограждающих дамб, что повышает вместимость хранилища, устойчивость откосов и снижает риск наступления аварийной ситуации. Данные процессы в настоящее время изучены недостаточно, поэтому исследование возможности глубокого обезвоживания пульп горно-обогатительных комбинатов является актуальной научной, технологической и производственной задачей.

Исследование минерального состава и свойств железистых кварцитов

В качестве исследуемых материалов были выбраны отходы обогащения руд железистых кварцитов – хвосты мокрой магнитной сепарации АО «Карельский окатыш». Отбор проб производился непосредственно в месте сброса хвостов. Определялись минеральный, химический и гранулометрический составы хвостов, также была определена истинная плотность минеральных частиц. Для определения истинной плотности хвостов в виде порошка и плотности монолитных образцов, включающих закрытые поры, использовался автоматический гелиевый пикнометр Ассур 1340. Средняя измеренная истинная плотность хвостов (плотность минеральных частиц) – 2,75 г/см³, плотность насыпных хвостов в сухом состоянии – 1,45 г/см³.

Для проведения анализов производилась предварительная подготовка проб, заключающаяся в высушивании хвостов и их измельчении по следующему порядку действий. Из объемной представительной пробы хвостов методом квартования выбиралась навеска массой не менее 2000 г. Данная навеска подвергалась многократному квартованию до получения остатка массой 25–50 г, размещалась ровным слоем в чистый, предварительно высушенный до постоянной массы металлический противень и взвешивалась. Масса навески составляла не менее 200 г. Противень с навеской помещался в сушильный шкаф, нагретый до температуры 105±5 °С, и выдерживался при заданной температуре 2 ч. По истечении двух часов противень с навеской извлекался из сушильного шкафа и взвешивался в горячем состоянии на электронных лабораторных весах АЖ-6200СЕ с точностью 10 мг (погрешность измерения 0,05%). После взвешивания навеска повторно отправлялась в сушильный

шкаф и измерения массы навески проводились каждые 15 мин до момента прекращения изменения массы навески, что свидетельствовало о достижении воздушно-сухого состояния навески. Количество высушенных подобным образом хвостов составило не менее 1 кг, что позволило получить представительную пробу хвостов для их дальнейшего измельчения.

Высушенная представительная проба хвостов массой 1 кг квартовалась до получения остатка массой 15–20 г, который подвергался измельчению на гидравлическом прессе до фракции –2 мм и затем в дисковом истирателе измельчался до фракции –0,1 мм. Подготовленные тонкодисперсные хвосты из нескольких проб истирались 3 раза для усреднения состава. Полученная навеска измельченных хвостов массой 5 г дополнительно истиралась в агатовой ступке до получения фракции –0,071 мм и отправлялась на анализы.

Определение минеральных составляющих отходов обогащения производилось с использованием рентгенофазового анализа методом рентгеновской дифракции и мёссбауэровской спектроскопии, последний из которых позволяет определять валентную форму нахождения железа в железосодержащих материалах. Было определено, что основной составляющей хвостов является кварц. Другие составляющие представлены кремнеземом и глиноземом, входящими в состав различных силикатов и алюмосиликатов, а также оксидами магния, марганца, железа и щелочных металлов. Кроме кварца, можно выделить присутствие таких минералов, как слюда и гидрослюда (биотит, глауконит), щелочные амфиболы (грюнерит, актинолит, родусит) и железистые амфиболы (кумингтонит), полевые шпаты, пироксены и щелочные пироксены, хлориты, карбонаты (кальцит, доломит, сидерит и сидероплезит), а также глинистых минералов. Из рудных минералов выделяются магнетит, гематит, гидрогематит и мартит. Источниками вредных примесей – серы и фосфора – являются пирит, пирротин и апатит.

Определение химического состава отходов обогащения железистых кварцитов производилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Данным методом возможно определить содержание основных элементов исследуемого материала, кроме углерода, серы и кремния. Измерения проводились на спектрометре iCAP 6300 Radial View. Содержание кремния определялось гравиметрическим способом. Для определения количества углерода и серы в хвостах применялся инфракрасно-абсорбционный метод анализа на приборе CS-230 ИН. В табл. 1 представлен химический состав отходов обогащения железистых кварцитов. Стоит отметить, что содержание железа общего составило 10,48%, а потери при прокаливании высушенных хвостов при 1000 °С в муфельной печи – 2,97%.

Гранулометрический состав твердой фазы хвостов, определенный ситовым анализом в соответствии с ГОСТ 12536–2014¹, показан в табл. 2. Исследуемые отходы обогащения в основном представлены средне- и мелкозернистыми частицами со значительной долей для данного вида хвостов крупно- и грубозернистых частиц. Также встречаются металлические включения, представленные фракциями от помольных шаров и стержней, вследствие используемой на предприятии технологии дробления и тонкого измельчения руд.

1 Межгосударственный стандарт: ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Доступ из электронного фонда правовых и нормативно-технических документов «Консорциум кодекс».

Таблица 1
Химический состав отходов обогащения руд железистых кварцитов

Элемент в форме оксида	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O + K ₂ O
%	5,14	9,26	71,14	3,11	3,98	1,82	0,31	0,22	2,05

Table 1
Chemical composition of ferruginous quartzite ore processing wastes

Таблица 2
Гранулометрический состав отходов обогащения руд железистых кварцитов

Класс, мм	+1,000	0,500–1,000	0,250–0,500	0,100–0,250	0,071–0,100	0,045–0,071	–0,045	Сумма
%	2,56	8,47	25,92	34,73	10,08	12,74	5,50	100,00

Table 2
Particle size distribution of waste from ferruginous quartzite ore processing

Анализ грансостава позволяет заключить, что большую часть хвостов (около 94,5%) составляют песчаные частицы (диапазон размеров 2,00–0,05 мм), в то время как пылеватые (0,050–0,005 мм) и глинистые (менее 0,005 мм) частицы суммарно содержатся в количестве около 5,5%. Определить более точно соотношение пылеватых и глинистых частиц было невозможно из-за выбранного метода анализа гранулометрического состава. Таким образом, в соответствии с ГОСТ 25100–2020² исследованные отходы обогащения железистых кварцитов могут быть отнесены к мелкозернистым пескам (содержание частиц с размером больше 0,10 мм превышает 75%), преимущественно состоящими из песков мелких (34,73%), средних (25,92%) и тонкозернистых (около 22%). Средневзвешенный диаметр частиц составил 0,266 мм.

По результатам определения гранулометрического состава отходов обогащения руд железистых кварцитов была построена кривая неоднородности грансостава исследуемых материалов (рис. 1). Количественным показателем гранулометрической кривой является коэффициент неоднородности $K_{нн}$, определяемый как отношение контролирующего диаметра d_{60} к эффективному диаметру d_{10} .

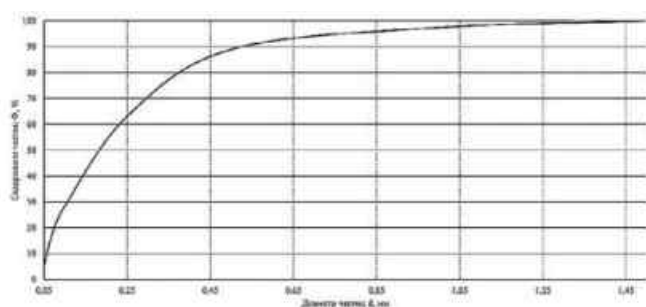


Рис. 1
Кривая неоднородности гранулометрического состава отходов обогащения руд железистых кварцитов

Fig. 1
Heterogeneity curve for the particle size distribution of waste from ferruginous quartzite ore processing

Для однородных материалов коэффициент неоднородности стремится к 1. При величине коэффициента больше 3 материал является неоднородным по составу [6]. По кривой неоднородности гранулометрического состава исследуемых отходов обогащения контролирующий и эф-

фективный диаметры составили соответственно 0,2305 и 0,0525 мм, тогда $K_{нн} = 4,39$ – хвосты АО «Карельский окатыш» являются неоднородными по составу.

Исследование возможности глубокого обезвоживания хвостов железистых кварцитов

Существующие технологические решения по обезвоживанию хвостовых пульп имеют своей целью повышение вместимости хранилищ, сокращение занимаемой ими площади, вовлечение в повторный оборот воды, рост уровня промышленной и экологической безопасности горнотехнических объектов. Сегодня такие компании, как Metso:Outotec, FLSmidth, WesTech Inc., АО «Механобр инжиниринг» и другие, предоставляют технологические решения по сгущению и глубокому обезвоживанию отходов обогащения твердых полезных ископаемых. Однако предлагаемые комплексы включают, как правило, несколько технологических операций, в которых доведение твердой части до нужной концентрации твердого производится поэтапно с использованием сгустителей и фильтров различной конструкции. При этом глубокое обезвоживание отходов осуществляется с использованием оборудования, требующего внушительных затрат при его эксплуатации и значительной территории для размещения. Такой подход влечет повышение стоимости складирования обезвоженных отходов в результате использования большого количества звеньев в технологической цепочке и вовлечения длинной системы конвейерных лент для доставки хвостов на удаленное хранилище.

В современной мировой практике наметились следующие основные направления оптимизации существующих схем обезвоживания пульп:

- максимальное сокращение аппаратов и упрощение технологической схемы сгущения пульп до высокой концентрации твердого;
- повышение эффективности и производительности очистки по тонкому классу твердых частиц;
- создание универсального оборудования, позволяющего осуществлять очистку воды, обезвоживание продукта и его сгущение в один цикл обработки в едином аппарате.

Поэтому для решения задачи очистки пульп горно-обогатительных комбинатов наиболее перспективным является использование фильтровальных элементов при воздействии вибраций – технологий, показавших высокую эффективность при обработке суспензий типа хвостовых пульп с различным содержанием и составом твердой фазы [7–10].

Обычно при фильтровании на разделительном элемен-

² Межгосударственный стандарт: ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Доступ из электронного фонда правовых и нормативно-технических документов «Консорциум кодекс».

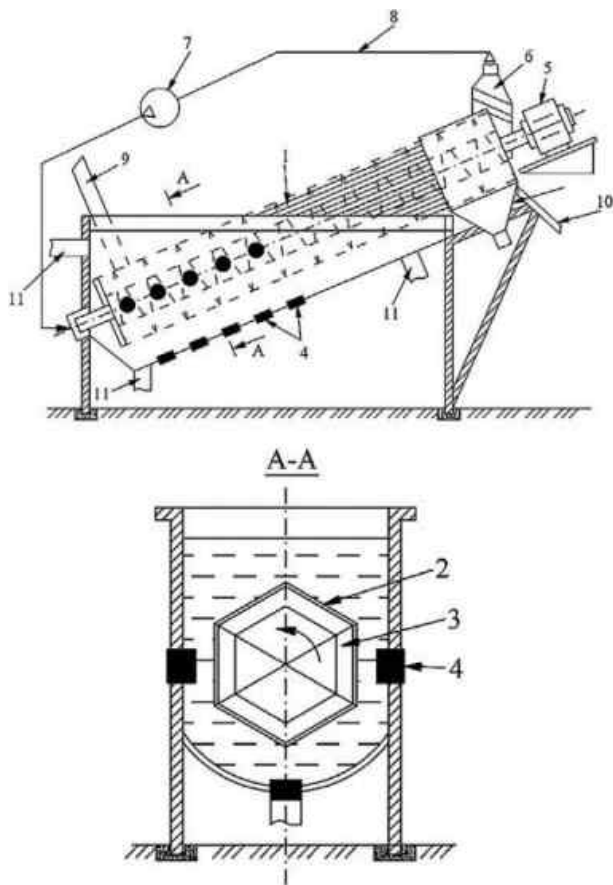


Рис. 2
Принципиальная схема вибративной машины для глубокого обезвоживания отходов обогащения железистых кварцитов: 1 – ванна; 2 – шестигранный барабан; 3 – транспортирующая спираль; 4 – вибровозбудители с излучающими мембранами; 5 – привод; 6 – коллектор; 7 – вентилятор; 8 – трубопровод для подачи газообразного теплоносителя; 9 – загрузочное приспособление; 10 – разгрузочное приспособление; 11 – патрубки

Fig. 2
A schematic representation of the vibrating machine for deep dehydration of processing wastes of ferruginous quartzites 1 – tank; 2 – hexagonal drum; 3 – spiral conveyor; 4 – vibration generators with emitting membranes; 5 – drive; 6 – collector; 7 – fan; 8 – pipe for the coolant gas; 9 – loading device; 10 – unloading device; 11 – nozzles

те образуется слой из задерживаемых частиц, что приводит к падению производительности процесса. Особенно сильно это проявляется при использовании фильтровальных элементов с мелкими ячейками (менее 100 мкм). За счет вибраций осуществляется непрерывная регенерация (восстановление) фильтра, что позволяет поддерживать его производительность в течение длительного времени. Наибольший эффект при этом достигается в случае вибрации не всего аппарата, а только жидкости, находящейся внутри него. В последнем случае около фильтра возникают противоточные потоки и гидравлические течения, которые разрушают накопившийся слой частиц [7–9].

Исследование возможности глубокого обезвоживания отходов обогащения железистых кварцитов проводилось на опытном образце вибративной маши-

ны, принципиальная схема которой показана на рис. 2. Производилось глубокое обезвоживание пульпы с массовым содержанием твердой фазы, характерным для условий работы АО «Карельский окатыш». Текущее значение твердого в исходной пульпе на предприятии колеблется в диапазоне 3–6 %_{масс} (среднее 4,8 %_{масс}), однако проект развития хвостового хозяйства до 2043 г. предусматривает реконструкцию сооружений с учетом выпуска в хранилище стуженных пульп с концентрацией твердого до 35–45 %_{масс}. В связи с этим исследование обработки в вибративной машине пульпы с массовым содержанием 3%, 4,8% и 45% твердых частиц представляло высокий интерес. Плотность пульп при испытаниях составляла 1019,5 кг/м³, 1031,5 кг/м³ и 1401,3 кг/м³ соответственно.

При проведении испытаний исходная пульпа с массовой концентрацией твердых частиц 3%, 4,8% и 45% подавалась в вибративную машину, в которой на фильтровальном элементе происходило отделение воды от твердой фазы хвостов. В качестве фильтров использовались шпальтовое сито с размером ячеек 50–70 мкм и сетка серии Pyramid фирмы Derrick с ячейкой 43–45 мкм. Во время испытаний измерялась производительность установки и эффективность процесса. По производительности рассматриваемого процесса глубокого обезвоживания пульпы определялись оптимальные режимы (динамический и частотный) воздействия колебаний.

Частота возбуждаемых вибраций f изменялась от 5 до 70 Гц, амплитуда колебательной скорости v от 0,01 до 0,1 м/с. Перепад давления ΔP на фильтрах изменялся от 0,02 до 0,05 МПа. С увеличением перепада давления в исследованном диапазоне эффективность обезвоживания и производительность машины возрастала монотонно, достигая максимума при $\Delta P = 0,05$ МПа. Исследования показали, что оптимальный частотный диапазон обработки отходов обогащения железистых кварцитов находился между значениями $f = 7–15$ Гц, вне этого диапазона наблюдалось падение производительности процесса. Полученные результаты определения зависимости удельной производительности вибративной машины от амплитуды колебательной скорости при $\Delta P = 0,05$ МПа и $f = 15$ Гц представлены на рис. 3 и 4 в виде графиков.

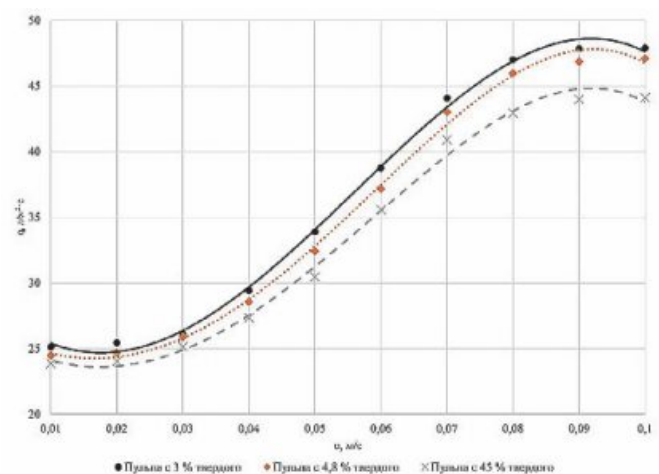


Рис. 3
Зависимость удельной производительности шпальтового сита от амплитуды колебательной скорости при $\Delta P = 0,05$ МПа и $f = 15$ Гц

Fig. 3
Dependence of the specific capacity of the slotted screen on the amplitude of the oscillating speed at $\Delta P = 0,05$ MPa and $f = 15$ Hz

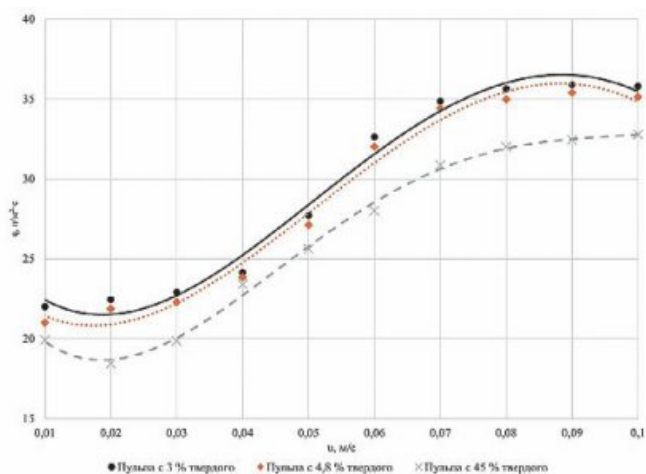


Рис. 4
Зависимость удельной производительности сетки Pyramid от амплитуды колебательной скорости при $\Delta P = 0,05$ МПа и $f = 15$ Гц

Fig. 4
Dependence of the specific capacity of the Pyramid screen on the amplitude of the oscillating speed at $\Delta P = 0,05$ МПа and $f = 15$ Hz

Из приведенных рис. 3 и 4 следует, что оптимальный диапазон амплитуды колебательной скорости находится в пределах 0,07–0,09 м/с. Выше 0,09 м/с наблюдается выполаживание кривой с тенденцией к падению производительности по пульпе при дальнейшем повышении амплитуды. Шпальтовое сито показывает более высокую производительность для всех трех пульп, достигая максимума 43–48 л/м²·с при $v = 0,09$ м/с. Максимальная производительность сетки Pyramid при $v = 0,09$ м/с находится в диапазоне 32–36 л/м²·с.

Анализ результатов показывает, что при применении вибраций при обработке хвостовых пульп обеспечивается высокая эффективность очистки и производительность процесса, достигающая значений 48 л/м²·с при работе на шпальтовом сите. Это наблюдается при определенных условиях воздействия вибраций, которые, в свою очередь, определяются режимом проведения процесса фильтрации и типом используемого фильтроэлемента. Более высокая удельная производительность шпальтового сита объясняется большим размером ячеек фильтра (50–70 мкм против 43–45 мкм у сетки Pyramid), что повышает пропускную способность сита.

Эффективность процесса также оценивалась по таким параметрам, как содержание класса –40–45 мкм в очищенной жидкости, коэффициенты отсева и полноты фильтрования, влажность обезвоженных хвостов. Для определения коэффициента отсева частиц и, соответственно, тонкости фильтрования определялся дисперсный состав сначала исходной пульпы, а затем жидкости, получаемой после обработки пульпы в вибрационной машине. Для каждого интервала фиксировали коэффициент отсева частиц, по значению которого судили о тонкости фильтрования испытуемого фильтра. Коэффициент полноты фильтрования для шпальтового сита составил $\varphi = 0,87$, а для сетки Pyramid $\varphi = 0,93$. В очищенной от хвостов жидкости концентрация взвесей составляла 3–5% от количества взвесей в исходной пульпе. При этом в очищенной жидкости присутствуют только частицы, размеры которых меньше 40–45 мкм, что позволяет реализовать повторное вовлечение в технологический цикл данной обработанной оборотной воды.

Определение дисперсного состава пробы очищенной жидкости определенного объема производилось на микроскопе Laboval в проходящем свете (максимальное уве-

личение составляло 448 крат). Одновременно при помощи окуляра-линейки (цена деления 2,5 мкм) измерялся размер частиц (по наибольшему размеру, условно принимаемому за их диаметр), а также подсчитывалось их количество в 100 полях зрения по интервалам. Полученные усредненные результаты по каждой серии экспериментов представлены на рис. 5.

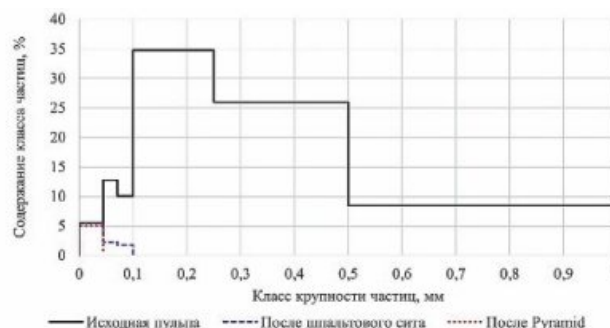


Рис. 5
Эффективность очистки пульпы в вибрационной машине при использовании шпальтового сита и сетки Pyramid

Fig. 5
Efficiency of slurry treatment in the vibrating machine using the slotted and the Pyramid screens

Анализ весовой влажности хвостов, обезвоженных в вибрационной машине, проводился высушиванием навески массой m_1 не менее 200 г при температуре 105 ± 5 °С до момента достижения навеской постоянной массы m_2 . Влажность определялась как отношение разницы масс m_1 и m_2 к массе высушенной навески m_2 . По усредненным данным влажность хвостов для пульп с различным содержанием твердых частиц находилась в диапазоне 7,89–10,66%. Можно сделать вывод, что предлагаемые технологические решения по ведению процесса обезвоживания в вибрационной машине обеспечивают получение хвостов, находящихся в условно сухом состоянии.

При проведении испытаний было установлено, что в процессе обработки отходов обогащения руд железистых кварцитов в вибрационной машине происходит эффективная регенерация фильтровальных элементов, позволяющая сохранять производительность машины на высоком уровне. Возникающие в процессе работы машины противоточные потоки, а также каскадно-водопадный режим движения обрабатываемой хвостовой пульпы обеспечивают высокую эффективность процесса глубокого обезвоживания пульпы. Установившийся режим движения пульпы в сочетании с вибрационным действием возбуждаемых колебаний приводит к генерации в машине мощных вихревых потоков, благодаря которым происходит интенсификация процесса разделения твердой фазы за счет ускорения процесса разрушения глинистых частиц и других примесей.

Заключение

Исследование свойств и состава отходов обогащения железистых кварцитов позволило сделать вывод о возможности их обезвоживания вибрационными технологиями с использованием фильтров, имеющих размер ячеек от 43 до 70 мкм. Глубокое обезвоживание хвостов, представленных преимущественно песчаными частицами, наиболее целесообразно производить в рассмотренной вибрационной машине с применением шпальтовых сит и сеток серии Pyramid.

Целесообразность использования фильтровальных эле-

ментов определяется требованиями технологического процесса и объемом поступающих пульп. При увеличенном выходе отходов обогащения с целью повышения производительности процесса обезвоживания рекомендуется использование шпальтового сита, в случае необходимости повышения качества осветленной воды с сохранением производительности очистки рекомендуется применение сеток серии Pyramid.

Внедрение в производство предлагаемых технологических решений по глубокому обезвоживанию отходов обогащения железистых кварцитов позволяет ежегодно

обрабатывать до 65% поступающих в хранилище хвостов в условиях АО «Карельский окатыш». Формирование хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения руд позволяет существенно сократить водонасыщенность техногенных отложений и ограждающих дамб и, таким образом, снизить вероятность наступления аварийной ситуации вследствие нарушения устойчивости откосов. Складирование глубоко обезвоженных хвостов позволяет сократить объем земляных работ при возведении дамб, уменьшить площадь нарушаемых территорий и вернуть в повторное использование очищенную от твердых частиц воду.

Список литературы

1. Stanwick P.A., Stanwick S.D. The Vale Brazilian dam collapse: an ethical and engineering disaster. *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2019;2(6):6–11. Available at: <https://iarjournals.com/060-B260611.pdf>
2. Van Niekerk H.J., Viljoen M.J. Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings-dam failures. *Land Degradation and Development*. 2005;16(2):201–212. <https://doi.org/10.1002/ldr.681>
3. Hatje V., Pedreira R.M.A., De Rezende C.E., Schettini C.A.F., de Souza G.C., Marin D.C., Hackspacher P.C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports*. 2017;7(1):10706. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>
4. Thompson F., de Oliveira B.C., Cordeiro M.C., Masi B.P., Rangel T.P., Paz P. et al. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. *Science of the Total Environment*. 2020;705:135914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>
5. Gelencsér A., Kováts N., Turóczy B., Rostási Á., Hoffer A., Imre K. et al. The red mud accident in Ajka (Hungary): Characterization and potential health effects of fugitive dust. *Environmental Science and Technology*. 2011;45(4):1608–1615. <https://doi.org/10.1021/es104005r>
6. Кириченко Ю.В., Шёкина М.В., Сенченко Д.С., Ческидов В.В. *Лабораторный практикум по дисциплине «Науки о Земле» для студентов специальности «Инженерная защита окружающей среды»*. М.: МГГУ; 2011. Ч. 2. 49 с.
7. Федоров Г.Б., Дудченко О.Л., Куренков Д.С. Разработка виброакустического модуля для тонкой очистки буровых растворов. *Записки Горного института*. 2018;234:647–651. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.647>
8. Дудченко О.Л., Федоров Г.Б. Виброакустическая техника для интенсификации обогащения угля. *Уголь*. 2019;(4):62–66. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-62-66>
9. Дудченко О.Л., Федоров Г.Б., Андреев А.А. Инновационный способ виброакустической классификации угольных пульп. *Уголь*. 2018;(6):67–71. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-6-67-71>
10. Ivanov M.V., Ksenofontov B.S. Intensification of flotation treatment by exposure to vibration. *Water Science and Technology*. 2014;69(7):1434–1439. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.046>

References

1. Stanwick P.A., Stanwick S.D. The Vale Brazilian dam collapse: an ethical and engineering disaster. *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2019;2(6):6–11. Available at: <https://iarjournals.com/060-B260611.pdf>
2. Van Niekerk H.J., Viljoen M.J. Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings-dam failures. *Land Degradation and Development*. 2005;16(2):201–212. <https://doi.org/10.1002/ldr.681>
3. Hatje V., Pedreira R.M.A., De Rezende C.E., Schettini C.A.F., de Souza G.C., Marin D.C., Hackspacher P.C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports*. 2017;7(1):10706. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>
4. Thompson F., de Oliveira B.C., Cordeiro M.C., Masi B.P., Rangel T.P., Paz P. et al. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. *Science of the Total Environment*. 2020;705:135914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>
5. Gelencsér A., Kováts N., Turóczy B., Rostási Á., Hoffer A., Imre K. et al. The red mud accident in Ajka (Hungary): Characterization and potential health effects of fugitive dust. *Environmental Science and Technology*. 2011;45(4):1608–1615. <https://doi.org/10.1021/es104005r>
6. Kirichenko Yu.V., Shchekina M.V., Senchenko D.S., Cheskidov V.V. *Laboratory practicum on the discipline “Earth science” for students of the speciality “Engineering environmental protection”*. Moscow: Moscow State Humanitarian University; 2011. Part 2. 49 p. (In Russ.)
7. Fedorov G.B., Dudchenko O.L., Kurenkov D.S. Development of vibroacoustic module for fine filtration of drilling muds. *Journal of Mining Institute*. 2018;234:647–651. <https://doi.org/10.31897/PMI.2018.6.647>
8. Dudchenko O.L., Fedorov G.B. Vibroacoustic technique for intensification of coal preparation. *Ugol’*. 2019;(4):62–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-62-66>
9. Dudchenko O.L., Fedorov G.B., Andreev A.A. Innovative method for the classification of coal slurries. *Ugol’*. 2018;(6):67–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-6-67-71>
10. Ivanov M.V., Ksenofontov B.S. Intensification of flotation treatment by exposure to vibration. *Water Science and Technology*. 2014;69(7):1434–1439. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.046>

Информация об авторе

Куренков Дмитрий Сергеевич – старший преподаватель кафедры геологии и маркшейдерского дела, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kurenkov@misis.ru

Information about the author

Dmitrii S. Kurenkov – Senior Lecturer, Geology and Survey Department, NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: kurenkov@misis.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.01.2023
 Поступила после рецензирования: 16.02.2023
 Принята к публикации: 16.02.2023

Article info

Received: 27.01.2023
 Revised: 16.02.2023
 Accepted: 16.02.2023