

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ТЕХНОЛОГИЮ И ПАРАМЕТРЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

А. И. Шевченко

ИГТМ им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины
ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, 49005, Украина. E-mail: alex-tpm@ukr.net

Изучено влияние свойств минеральных частиц на технологию и параметры оборудования при извлечении полезных компонентов из хвостохранилищ. Выбор рациональной технологии и оборудования для обогащения тонкозернистого сырья необходимо производить с учетом свойств сырья, т.к. с уменьшением крупности частиц изменяются их свойства, увеличивается энергия связи жидкости с поверхностью твердого, т.е. сопротивление протеканию воды в поровом пространстве, что препятствует эффективному обезвоживанию и разделению по крупности. Для повышения эффективности этих процессов был предложен новый метод виброударного грохочения. Экспериментами установлено, что использование нового способа при переработке сырья, которое традиционными методами практически не классифицируется и не обезвоживается, позволяет повысить извлечение класса $-0,1$ мм до 75–85 %, а влажность надрешетного материала снижать до 6–8 %. Разработаны методики расчета рациональных параметров этих процессов. Использование технологии, включающей тонкую классификацию с обезвоживанием, при переработке отходов позволит: расширить сырьевую базу и повысить экономическую эффективность добывающих и перерабатывающих предприятий; значительно улучшить экологическую обстановку в добывающих и перерабатывающих регионах.

Ключевые слова: крупность, свойства, частицы, влажность, разделение по крупности, обезвоживание, виброударное грохочение

ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ МІНЕРАЛЬНИХ ЧАСТИНОК НА ТЕХНОЛОГІЮ І ПАРАМЕТРИ ОБЛАДНАННЯ ПРИ ВИЛУЧЕННІ КОРИСНИХ КОМПОНЕНТІВ З ХВОСТОСХОВИЩА

О. І. Шевченко

ИГТМ ім. М.С. Полякова Національної академії наук України
вул. Симферопольська, 2а, м Дніпро, 49005, Україна. E-mail: alex-tpm@ukr.net

Вибір раціональної технології і обладнання для вилучення і збагачення відходів видобутку і переробки корисних копалин, що зберігаються в накопичувачах (хвостосховищах), необхідно проводити з урахуванням властивостей сировини: гранулометричний склад, вологість, кількість корисного компонента і відходів (наприклад, у вугільних шламах – кількість вуглецю і золи у класах) і т.п. Сировина, що переробляється, має складний гранулометричний склад, тому властивості сировини значно змінюються в залежності від розміру часток. Вологоутримуюча здатність матеріалів залежить від питомої поверхні частинок і від енергії, що витрачається на взаємодію з водою. Найбільші труднощі викликає зневоднення та розділення за крупністю тонких і дрібних частинок, тому що продукти, сформовані з них, утримують значні кількості води завдяки високоро-

звиненій поверхні частинок, що активно взаємодіє з водою, і чинним капілярним і електростатичним силам. На подолання частинками сил, що діють з боку рідини, впливають геометричні параметри частки, її щільність, поверхневий натяг, щільність і в'язкість рідини; кут змочування; амплітуда і частота віброзбудження. Для підвищення ефективності процесу поділу по крупності і зневоднення був запропонований новий метод віброударного грохочення. Експериментами встановлено, що використання нового способу при переробці сировини, яка традиційними методами практично не класифікується і не зневоднюється, дозволяє підвищувати витяг класу $-0,1$ мм до 75-85%, а вологість надрешітного матеріалу знижувати до 6-8%. Розроблено методики розрахунку раціональних параметрів цих процесів. Використання технології, що включає тонку класифікацію з зневодненням, при переробці відходів дозволить: розширити сировинну базу і підвищити економічну ефективність видобувних і переробних підприємств; значно поліпшити екологічну обстановку в видобувних і переробних регіонах.

Ключові слова: крупність, властивості, частинки, вологість, поділ по крупності, зневоднення, віброударне грохочення.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современное состояние техники и технологии добычи полезных ископаемых (рудных, нерудных, энергетических материалов и т.п.) привело к тому, что в сырье, поступающем на обогащение, содержится около трети частиц шламовой крупности. Решение задач повышения качества товарных концентратов при одновременном увеличении объемов обогащения неразрывно связано с переработкой и обезвоживанием мелких и тонких классов, количество которых постоянно растет. Транспортабельность и стоимость таких продуктов зависит от их влажности, высокие значения которой снижают эффективность использования этих материалов. Поэтому совершенствование технологий, связанных с тонкими частицами и шламами, является важной задачей производства [1].

С вовлечением в обогащение тонкодисперсных видов минерального сырья изменяется привычное представление о полезных ископаемых. В технологических схемах все большую роль начинает играть размерный фактор сосуществующих минералов. В организации системы подготовки и выбора оптимальных методов обогащения и обезвоживания минерального сырья важно учитывать свойства минералов и их агрегатов, определяющие минералого-технологические особенности типов и сортов сырья. При наличии в технологических схемах тонкодисперсного сырья учет размеров частиц становится определяющим фактором в технологиях обогащения. Особое место занимают отходы добычи и переработки полезных ископаемых, хранящиеся в накопителях (хвостохранилищах) и оказывающие, с одной стороны, значительную экологическую нагрузку на окружающую среду, с другой, являющиеся потенциальными источниками черных, цветных, благородных, редких металлов, неметаллического и энергетического сырья. Перспективы их промышленного освоения могут быть связаны только с созданием эффективных технологий переработки и обезвоживания, базирующихся на максимально полной информации о вещественном составе и строении техногенного сырья [1–8].

Чтобы учесть особенности изменения свойств минералов, в том числе и направленные на повышение степени их контрастности в технологическом режи-

ме, следует иметь в виду, что они формируются и проявляются в широком гранулометрическом спектре, как при подготовке, так и в различных узлах схемы обогащения. При тонком измельчении могут значительно измениться конституция минералов (вплоть до появления новообразованных фаз, явлений аморфизации и др.), свойства поверхности и т.п. [2–8].

Обзор публикаций [1–8] позволяет заключить, что, несмотря на значительный объем теоретических и экспериментальных исследований, изменение свойств минерального сырья, особенно тонкодисперсных продуктов исследовано недостаточно. В связи с этим исследования направленные на изучение влияния крупности частиц на изменение их физико механических свойств и на выбор технологии и оборудования для их обогащения и обезвоживания являются, несомненно, актуальными.

Формулирование целей статьи. Одна из причин, по которой сдерживается повышение эффективности процесса обезвоживания и разделения по крупности, большое разнообразие перерабатываемого сырья с различными физико-механическими свойствами и грансоставом, которое требует индивидуального подхода в каждом конкретном случае.

Выбор рациональной технологии и оборудования для извлечения и обогащения отходов добычи и переработки полезных ископаемых, хранящихся в накопителях (хвостохранилищах), необходимо производить с учетом свойств сырья: гранулометрический состав, влажность, количество полезного компонента и отходов (например, в угольных шламах – количество углерода и золы в классах) и т.п.

Из обзора публикаций и аналитическими исследованиями установлено, что в большинстве случаев перерабатываемое сырье имеет сложный гранулометрический состав, свойства которого меняются в зависимости от размера частиц довольно отчетливо, а иногда и резко, что послужило основанием для разделения их на группы, или фракции. По содержанию фракций классифицируют сырье (классификация по крупности) [1–9].

Из-за многообразия перерабатываемого сырья, а также сферы его использования существуют различные виды классификации. Например, продукты добычи и переработки в зависимости от размера частиц подразделяются на крупнообломочные (> 2 мм), песчаные (от 2 до 0,05 мм), пылеватые (от 0,05 до 0,005 мм) и глинистые (менее 0,005 мм). Свойства фракций гранулометрического состава весьма различны. Эти свойства передаются минеральному сырью в соответствии с преобладанием тех или иных фракций [9].

Кроме гранулометрического состава огромное влияние на свойства сырья оказывает влажность, которая определяет его физическое состояние. При обогащении полезных ископаемых наибольшее распространение получили методы, основанные на использовании воды, так называемые, мокрые методы обогащения. Однако готовая продукция должна иметь минимальную влажность – отсюда необходимость применения обезвоживания. Подобные проблемы возникают также при дообогащении влажного техногенного сырья (рудных, угольных шламов, строительных песков и т.п.), состоящего, в основном, из частиц размером менее 1-5 мм (тонкозернистое сырье) [10].

Воду по степени её подвижности, характеру связи и влияния на состояние и свойства сырья классифицируют на: связанную воду, воду связанную капилляр-

ними силами и свободную воду. Все эти категории воды присутствуют при обогащении совместно, переходят друг в друга и изменяют физические свойства сырья: объёмную и насыпную плотность, сыпучесть, адгезию, замерзание [1–9].

Влагоудерживающая способность материалов зависит от удельной поверхности частиц и от энергии, расходуемой на взаимодействие с водой. Анализ исследований последних лет, показал, что наибольшие трудности вызывают обезвоживание тонких и мелких частиц, т.к. продукты, сформированные из них, удерживают значительные количества воды благодаря высокоразвитой поверхности частиц, активно взаимодействующей с водой, и действующим капиллярным и электростатическим силам. Пористость и проницаемость этих сред обычно низкая. Чем больше поверхность частиц и степень их смачивания, тем больше влаги может удерживать этот материал и тем труднее ее отделить, т.е. с уменьшением крупности частиц в продуктах увеличивается энергия связи жидкости с поверхностью твердого, т.е. сопротивление протеканию воды в поровом пространстве. Чем больше эта энергия, тем труднее жидкость отделить. Поэтому наиболее тяжело удалять воду, связанную капиллярными силами (силами поверхностного натяжения) [1–9].

Из анализа научно-технической информации [1–19] установлено, что на преодоление частицами сил, действующих со стороны жидкости, влияют следующие факторы: геометрические параметры частицы, ее плотность, поверхностное натяжение, плотность и вязкость жидкости; угол смачивания; амплитуда и частота вибровозбуждения. Поэтому необходимо учитывать эти свойства.

При исследовании физических и физико-химических показателей различных фракций, выделяемых при механическом анализе, были вскрыты глубокие различия в свойствах [1–9].

В табл. 1 показано как изменяются свойства минерального сырья в зависимости от размера частиц [9].

Таблица 1 – Основные физические свойства механических фракций [9]

Размер фракций, мм	Максимальная молекулярная влагоемкость, %	Высота поднятия капиллярного столба воды, см	Коэффициент фильтрации, см/с	Набухание, % по отношению к первоначальному объему
3 – 2	0,2	0	0,5	–
2,0 – 1,5	0,7	1,5 – 3,0	0,2	–
1,5 – 1,0	0,8	4,5	0,12	–
1,0 – 0,5	0,9	8,7	0,072	–
0,5 – 0,25	1,0	20 – 27	0,056	0
0,25 – 0,1	1,1	50	0,03	5
0,1 – 0,05	2,2	91	0,005	6
0,05 – 0,01	3,1	200	0,0004	16
0,01 – 0,005	15,9	–	–	105
0,005 – 0,001	31,0	–	–	160
< 0,001	–	–	–	405

Фракции песчаных частиц с диаметром более 0,25 мм (см. табл. 1) обладают нулевым набуханием, относительно высокой фильтрацией и ничтожной водо-подъемной способностью. Перелом этих свойств начинается в частицах с диаметром меньше 0,25 мм, т. е. во фракциях мелкого песка и пыли. В них заметно возрастает высота капиллярного поднятия при одновременном появлении набухаемости и снижении коэффициента фильтрации. Весьма значительная высота капиллярного поднятия, большие величины набухания, пластичности и максимальной молекулярной влагоемкости появляются лишь в иловатых и глинистых частицах. С возрастанием содержания глины происходит резкое увеличение молекулярной влагоемкости сырья [1–9].

Таким образом, из анализа литературы установлено, что при классификации и обезвоживании влажного минерального сырья существенное влияние на эффективность оказывают его физико-механические свойства, в частности, гранулометрический состав материала, влажность, наличие комкующих примесей (например, глины) и другие факторы [9, 10]. Влияние указанных факторов усиливается с увеличением содержания мелких (тонких) частиц в материале и уменьшением крупности разделения. Мелкие классы имеют наибольшую поверхностную влажность вследствие их большой свободной удельной поверхности.

Влияние влажности в основном определяется содержанием внешней (поверхностной) влаги, покрывающей пленкой поверхность частиц материала и удерживаемой силами поверхностного натяжения. Вода, находящаяся в порах и трещинах частиц, а также химически связанная, на процесс классификации влияние не оказывает. Поверхностная влага вызывает слипание мелких частиц между собой, прилипание их к крупным кускам и замазывание рабочих зон (например, отверстий сит) вязким материалом. Кроме того, вода смачивает проволоки сита и может под действием сил поверхностного натяжения образовывать пленки, затягивающие отверстия [10].

При наличии в материале глинистых примесей, классификация, даже при незначительной влажности, затрудняется. Глинистые примеси образуют комки (агрегаты), уносящие мелкие частицы в надрешетный продукт, при этом глина быстро залепляет отверстия сита [10]. Из изложенного видно, что указанные факторы, препятствуют не только обезвоживанию тонких продуктов, но и классификации (взаимное влияние классификации по крупности и обезвоживания).

Следует отметить также, что основные физические свойства таких полидисперсных систем зависят от степени их дисперсности, пористости и проницаемости продуктов, значение которых определяются гранулометрическим составом сырья и параметрами поровой среды. Низкой проницаемостью обладают продукты с высоким содержанием (более 30%) тонких или глинистых частиц. Чем меньше крупность частиц обогащаемого сырья, тем больше энергии необходимо приложить для его классификации и обезвоживания [10].

Важным показателем при обогащении является граничная крупность разделения, т.е. необходимо установить количество полезного продукта в классах крупности. Многообразие сырья не позволяет сделать комплексный подход в этом направлении, т.к. в каждом конкретном случае требуется индивидуальный подход.

Например, при переработке строительных песков (частицы крупностью от 0 до 5 мм) для получения из исходного сырья продукта, пригодного для приготовления качественных строительных смесей, необходимо удалить пыль и глинистые включения – частицы размером менее 0,14 мм (регламентировано «Требованиями к продукции. Зерновой состав песка») [11]. Как известно, наличие пыли и глины при приготовлении смесей бесполезно увеличивает количество связующих, что значительно повышает себестоимость готовой продукции. Это возможно осуществить путем тонкой классификации с промывкой, после которой требуется обезвоживание.

Для доведения готовой продукции до необходимой влажности чаще применяют сочетание механического и термического обезвоживания. При сравнении этих методов обезвоживания с позиций их экологической и стоимостной оценки предпочтение отдается, как правило, первому, особенно в случаях, когда не предъявляются жесткие требования к влажности продукта, но доведение его до транспортабельного состояния является необходимым [10].

Механическое обезвоживание является наиболее дешевым и широко применяемым. Повышение эффективности удаления влаги из тонких продуктов механическими методами позволяет экономить энергию, расходуемую при термической доводке продуктов до товарной влажности. Для этих целей используется большое разнообразие оборудования с различными принципами действия [10].

Наиболее широко используется обезвоживание на вакуум-фильтрах, центрифугах и виброгрохотах [10].

Обезвоживание на вакуум-фильтрах различных конструкций осуществляется в непрерывном режиме их работы, что является преимуществом, а главные недостатки – это довольно высокая влажность обезвоженного осадка (20-25 %), значительный унос полезного твердого продукта в фильтрат при обезвоживании мелкого минерального сырья с крупностью частиц менее 0,5 мм и высокое сопротивление осадка при вакуумном фильтровании [10].

В последние годы начали использоваться центрифуги для обезвоживания угольных шламов после флотации и угольной мелочи – после мелкой отсадки. Этот метод позволяет снижать содержание влаги до 6,0 %, но для его реализации необходимо дорогостоящее оборудование [10].

Грохоты проще и дешевле вакуум-фильтров и центрифуг. Вибрационное грохочение является экономически более целесообразным, т.к. эти аппараты, в отличие от вакуум-фильтров и центрифуг, способны совмещать две операции: разделение по крупности и обезвоживание. Однако, как показала практика, традиционные методы позволяют эффективно грохотить только материалы с размерами частиц более 1 мм, а влажность готового продукта снизить до 18-22 % в зависимости от крупности. При тонком и сверхтонком грохочении удаление жидкости требует существенных энергозатрат, поскольку этому процессу препятствуют силы поверхностного натяжения, которые значительно превосходят силу тяжести [11–13]. Грохочение материалов крупностью 0,5-1 мм традиционными методами не дает высоких результатов, а при размере частиц менее 0,2 мм практически невозможно. Особую трудность представляет переработка широких классов крупности, когда необходимо отделить тонкие классы (как правило, некондиционный продукт) и максимально обезводить готовый (надрешетный) продукт.

ГІРНИЧІ МАШИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ

В табл. 2 приведена влажность продуктов обогащения углей после обезвоживания на различных аппаратах, которая принимается в расчетах по данным практики углеобогащения [10].

Таблица 2 – Влажность продуктов обогащения углей, принимаемая по результатам практики

Наименование продукта	Крупность, мм	Влажность продуктов, %, после обезвоживания в:				
		элеваторах	грохотах	центрифугах	вакуум-фильтрах	фильтр-прессах
Продукты отсадки:						
Концентрат	13-150		6-12			
Концентрат (марка А)	6-13		7-9			
Концентрат	0,5-13	18-22	14-16	8-10		
Промпродукт	13-150	9-14	7-13			
Промпродукт	0,5-13	19-23	15-17	8-12		
Отходы	13-150	10-15	8-14			
Отходы	0,5-13	20-24	16-20			
Продукты тяжелых сред						
Концентрат	13-200, 300		6-12			
Концентрат (марка А)	6-13		7-9			
Концентрат	0,5-13		14-16	8-10		
Концентрат	0,5-6		16-18	9-10		
Промпродукт	13-200, 300		7-13			
Промпродукт	0,5-13		15-17	7-12		
Отходы	13-200,300		8-14			
Отходы	0,5-13		20-24			
Продукты флотации:						
Концентрат	0-0,5				23-26	
Концентрат (марка А)	0-0,5				21-23	
Отходы	0-0,5					22-30

Как видно из табл. 2 показатели обезвоживания достаточно низкие. При размокаемых породах (содержание глинистых частиц больше 50 %) влажность продукта увеличивается на 20 % [10].

Таким образом, известные технологии и технические средства выделения и обезвоживания тонких фракций не обеспечивают эффективного обезвоживания. В связи с этим, проблему переработки влажных тонких классов и техногенных

отходов можно решить путем интенсификации и совершенствования существующих технологий.

Обзор работ в области механического обезвоживания тонких труднофилтруемых продуктов и анализ теоретических и экспериментальных исследований показал [14], что процессы перемещения жидкости в этих продуктах исследованы недостаточно полно.

Авторы расходятся во мнениях при изучении влияния различных факторов на изменение структуры тонких продуктов и течение через них жидкой фазы. Отсутствуют в большинстве случаев количественные параметры и оценка напряжений и возникающих деформаций в продуктах при приложении различных механических воздействий. При этом многие авторы указывают на имеющие место резервы повышения эффективности процесса обезвоживания и классификации тонких продуктов путем интенсификации именно механического воздействия на них, как наиболее реализуемого и относительно недорогого.

Методы интенсификации этих процессов могут быть различны. Значительные перспективы имеют методы физико-механической интенсификации работы существующего оборудования, позволяющие повысить эффективность обезвоживания без значительных капитальных вложений. Однако физические методы интенсификации обезвоживания не получили пока широкого распространения вследствие сложности их применения, а в ряде случаев из-за необходимости создания специального оборудования. Поэтому разработка и создание ресурсосберегающей технологии, средств классификации и обезвоживания тонкодисперсных частиц из жидких отходов переработки минерального сырья является актуальной.

Из приведенных выше методов обезвоживания наиболее простым и экономичным является вибрационное грохочение. Детальный анализ этого метода рассмотрен в работах [14].

Для преодоления сил сцепления между влажными частицами используют различные механизмы, одним из которых является комбинированное возбуждение, которое обеспечивает интенсивное перемещение жидкости и частиц относительно друг друга. Под комбинированным подразумевается возбуждение с различными сочетаниями поличастотных, импульсных динамических влияний, также возможны и дополнительные влияния различных физических полей [14–19].

В Институте геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной Академии Наук Украины (ИГТМ НАН Украины) на протяжении многих лет ведутся исследования и совершенствования процессов классификации и обезвоживания с помощью вибрационного грохочения, о чем говорят публикации о последних разработках в этом направлении.

Авторами работы [15] предложен метод комплексного обезвоживания влажного минерального сырья, который объединяет три механизма обезвоживания (вибрационный, электрокинетический и вакуумный), сосредоточенных в одном устройстве. Применение электрокинетического метода на основе электроосмоса (под действием гальванического тока части молекул воды, разлагаемых в этом поле, переносятся от одного полюса к другому через обезвоживаемый слой пористой горной массы) показало положительные результаты при обезвоживании угольных флотоконцентратов. За счет использования этого метода при различ-

ной исходной влажности горной массы влажность снижена с 30 до 16 %, с 20 до 14 % и с 10 до 6 %. Эти результаты получены для узких классов крупности $0,25 \div 0,63$ мм [15]. Однако при извлечении полезных компонентов из хвостохранилищ предприятия сталкиваются с необходимостью не только обезвоживания, но и разделения по крупности различного сырья, как узких, так и широких спектров крупности.

В работах [16–19] показано, что классификация и выделение тонких фракций минерального сырья, отходов его переработки и обогащения может успешно осуществляться при вибрационном грохочении на просеивающих поверхностях, совершающих поличастотные колебания с широким сплошным частотным спектром и с ускорениями в сотни м/с^2 . При повышении сил сцепления между тонкодисперсными частицами за счет уменьшения их крупности и повышения влажности до 10 % уровень ускорений рабочего органа вибрационного поличастотного грохота необходимо увеличивать и для тонкодисперсных сред с крупностью частиц не менее 20 мкм ускорения, обеспечивающие эффективную классификацию частиц не превышают $450 - 500 \text{ м/с}^2$.

Исходя из природы сил, обуславливающих связь частиц сыпучей среды с влагой, последнюю подразделяют на адсорбированную (связанную), капиллярную и свободную (гравитационную). Применительно к грохочению наиболее важен учет сил, обусловленных наличием капиллярно-стыковой воды (менисков), удаление которой является наиболее сложным. В зависимости от вида укладки частиц в пористой среде содержание капиллярно-стыковой воды колеблется от 18 % до 30 % (в среднем 24 %) от общего количества воды при полном насыщении среды [11].

В связи с вышеизложенным, для преодоления сил сцепления между частицами и повышения эффективности обезвоживания и разделения по крупности при тонком грохочении представляется перспективным использование импульсного воздействия за счет виброудара непосредственно по сити или через промежуточный элемент.

Для этого в ИГТМ НАН Украины предложен новый способ виброударного грохочения (импульсное воздействие на просеивающую поверхность и перерабатываемый материал) [11–14], заключающийся в следующем. Короб грохота и активатор возбуждают гармоническими колебаниями, которые преобразовываются ударными элементами в импульсы. Материал подают на активатор, установленный над просеивающей поверхностью на расстоянии, менее высоты подбрасывания материала, где под действием вынужденных колебаний активатора материал разрыхляется для свободного перемещения через отверстия активатора на просеивающую поверхность. За счет взаимодействия ударных элементов с просеивающей поверхностью осуществляется усиление ее колебаний, в результате чего надрешетный материал подбрасывается. За промежуток времени от момента отрыва материала от просеивающей поверхности и до падения ему сообщают дополнительные импульсы за счет колебаний активатора.

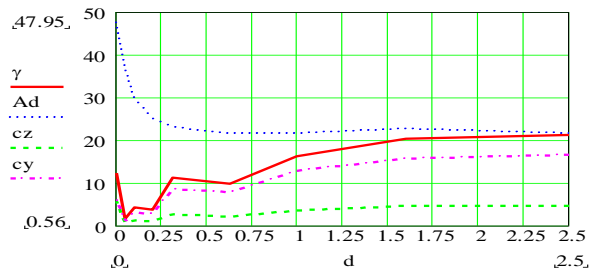
Дополнительно активатор возбуждают дезинтегрирующими элементами (ДЭ) для усиления воздействия на разделяемый материал и жидкость в локальных областях нормальными и сдвиговыми импульсами, которые изменяют по

длине активатора. Вследствие этого происходят разрыв капиллярных мостиков и потеря устойчивости капиллярных менисков в ячейке просеивающей поверхности, разделение материала по величине частиц и очистка просеивающей поверхности от частиц, застрявших в ячейках и налипшего материала, что улучшает процесс классификации и обезвоживания.

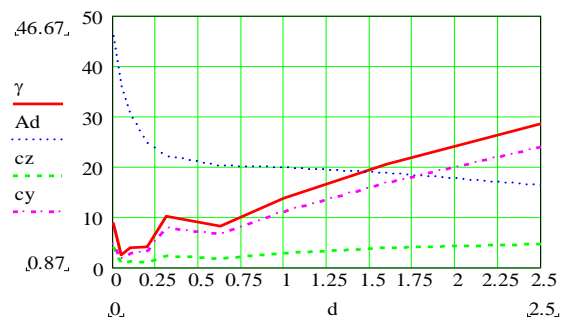
Предварительные эксперименты показали высокую эффективность нового способа виброударного грохочения при разделении по крупности и обезвоживании различного сырья, как узких, так и широких спектров крупности. Вместе с тем не была установлена граничная крупность разделения, при которой достигаются высокие результаты грохочения.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. На начальном этапе в ИГТМ НАН Украины в лабораторных условиях были выполнены эксперименты по определению требуемой граничной крупности разделения на примере отходов углеобогащения (угольных шламов с размерами частиц также от 0 до 5 мм). Поскольку шламы представляют собой углеродносиликатную массу, физическая сущность метода их обогащения заключается в разделении их на составляющие: углерод – силикаты и обезвоживании.

Для оценки количества полезного компонента в угольных шламах в ИГТМ НАН Украины выполнены экспериментальные исследования и построены зависимости выхода γ , зольности A^d , содержания золы c_z , содержания угля c_y в классах крупности d (рис. 1).



а) шламы шахты им. Фрунзе



б) шламы шахты 81-я

Рисунок 1 – Зависимости выхода γ , зольности A^d , содержания золы c_z , содержания угля c_y в классах крупности d в угольных шламах

Из анализа графиков следует, что по мере уменьшения крупности содержание зольной части растет, а максимум находится в классах крупностью от 0 до 0,315 мм. Наибольшее количество углерода при зольности 20-22 % находится в классах более 0,25 мм, в классах менее 0,25 мм содержание угля уменьшается, а зольность увеличивается. На этом этапе установлена возможность с помощью тонкой классификации по классу 0,25 мм получения из высокзолных шламов продукта с высоким содержанием углерода при нормативной зольности. При этом необходимо снизить влажность до 10-12 %.

Как следует из вышеизложенного, подобные отходы можно перерабатывать с помощью мокрой тонкой классификации с последующим обезвоживанием. Для этого необходимо иметь классифицирующее и обезвоживающее оборудование, способное эффективно работать по граничной крупности 0,2-0,3 мм и менее.

Для оценки эффективности нового способа виброударного грохочения выполнены экспериментальные исследования классификации и обезвоживания угольных шламов. Граничная крупность разделения составляла 0,1 мм, влажность исходного продукта – 30 %.

На рис. 2 показаны зависимости влажности W надрешетного продукта и извлечения ε частиц заданной крупности в подрешетный продукт от времени t грохочения при переработке угольного шлама.

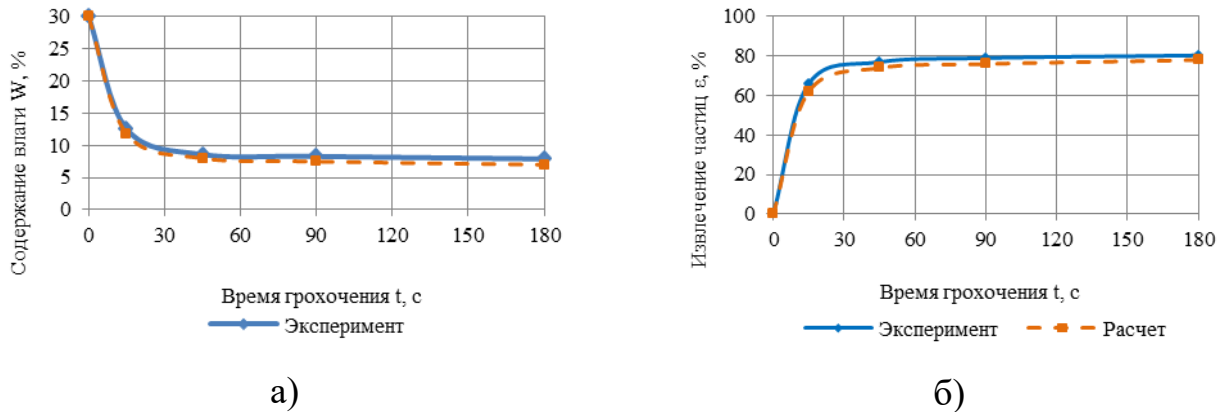


Рисунок 2 – Экспериментальные и расчетные зависимости влажности W надрешетного продукта и извлечения ε частиц заданной крупности в подрешетный продукт от времени t грохочения при переработке угольного шлама

Результаты экспериментов (рис. 2) показали достаточно высокие показатели грохочения: при снижении влажности надрешетного материала до 6-8 %, извлечение класса -0,1 мм в подрешетный продукт составляло 75-85 %.

Таким образом, установлено, что с помощью нового способа виброударного грохочения можно достаточно эффективно перерабатывать отходы обогащения путем отделения тонких частиц и обезвоживания надрешетного продукта. Однако для выбора рациональных параметров этого процесса необходимо иметь возможность их вычисления. При этом необходим учет влияния капиллярных сил, чтобы описать движение жидкости в отверстиях просеивающей поверхности и через слой минерального сырья с учетом его свойств.

На основе ранее разработанных математических моделей [20, 21] созданы методики расчета рациональных параметров обезвоживания и грохочения с обезвоживанием при импульсном воздействии.

В методике расчета рациональных параметров обезвоживания описан процесс удаления жидкости, находящейся в капиллярно-стыковочных мостиках между частицами, геометрические и энергетические условия, при которых жидкость перемещается между частицами.

Методика расчета рациональных параметров грохочения с обезвоживанием комплексно учитывает начальные распределения частиц и жидкости по высоте слоя минерального сырья, сегрегацию, перемешивание, просеивание, особенности вибротранспортирования (скорость, кратность и количество падений за период вибротранспортирования) и изменение высоты слоя, взаимное влияния классификации по крупности и обезвоживания. На основании расчета опреде-

ляются технологические показатели грохочения и обезвоживания: извлечение частиц заданной крупности в подрешетный продукт, производительность по подрешетному продукту, масса надрешетного продукта в контрольном объеме, масса жидкости в надрешетном продукте, влажность надрешетного продукта. Эффективность грохочения оценивается по извлечению частиц заданной крупности в подрешетный продукт и влажности надрешетного продукта.

Методики позволяют на основе численного моделирования определить рациональные технологические и режимные параметры процесса обезвоживания и разделения по крупности, при которых обеспечивается энерго- и ресурсосбережение.

Изучение кинетики обезвоживания при виброударном грохочении с помощью численных экспериментов выполнены для материалов узких и широких спектров крупности при различных режимах виброударного грохочения. Результаты исследований позволили установить, что экспериментальные и расчетные данные отличаются не более, чем на 15 %, т.е. формулы математической модели с доверительной вероятностью 0,95 адекватно описывают экспериментальные результаты [22, 23].

Методики расчета внедрены на горно-обогатительных предприятиях и карьерах.

ВЫВОДЫ. 1. Одна из причин, по которой сдерживается повышение эффективности переработки отходов, хранящихся в накопителях (хвостохранилищах), большое разнообразие перерабатываемого сырья с различными физико-механическими, которое требует индивидуального подхода в каждом конкретном случае.

2. Выбор рациональной технологии и оборудования для обогащения тонкозернистого сырья необходимо производить с учетом свойств сырья: гранулометрический состав, влажность, количество полезного компонента (например, количество углерода в классах) и отходов (количество золы в классах) и т.п.

3. Перспективным представляется переработка отходов обогащения с помощью тонкого вибрационного грохочения. Однако традиционные технологии и технические средства разделения и обезвоживания тонких фракций не обеспечивают высоких показателей. В связи с этим, проблему техногенных отходов можно решить путем интенсификации и совершенствования существующих технологий, например, путем виброударного грохочения (импульсного воздействия на просеивающую поверхность и сырье).

4. Установлено, что использование нового способа виброударного грохочения (импульсное воздействие на просеивающую поверхность и перерабатываемый материал) при переработке сырья, которое традиционными методами практически не классифицируется и не обезвоживается, позволяет повышать извлечение класса -0,1 мм до 75–85 %, а влажность надрешетного материала снижать до 6–8 %.

5. Разработанные методики расчета позволяют по исходным данным (с учетом свойств сырья) для процессов обезвоживания и грохочения с обезвоживанием расчетным путем определить рациональные параметры этих процессов при переработке различного сырья. На их основе возможен синтез рационального процесса грохочения и обезвоживания, а также анализ работы существующих грохотов с целью выявления путей для их модернизации.

6. Применение технологии, включающей тонкую классификацию с обезвоживанием, при переработке отходов позволит: повысить экономическую эффективность добывающих и перерабатывающих предприятий; расширить сырьевую базу для строительных, коксохимических производств и энергетики; решить проблемы отвода новых площадей и емкостей для складирования отходов; значительно улучшить экологическую обстановку в добывающих и перерабатывающих регионах.

Автор выражает благодарность научному консультанту доктору технических наук Лапшину Евгению Семеновичу, ведущему научному сотруднику отдела геомеханических систем и вибрационных технологий Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины) за указания по определению главных направлений моего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродская Р. Л. Онтогенетический анализ на микро- и наноуровне минеральных индивидов и агрегатов для реставрации условий рудобразования и оценки технологических свойств минерального сырья. 2016. Получено из <http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/viewFile/46/47>

2. Науменко В. Г. Методика исследования характеристик тонкодисперсных углесодержащих осадков, имеющих значение для механического обезвоживания. *Донецкий национальный технический университет*. 2014. Получено из <http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/30415/1/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F%20%D0%B2%20%D0%A1%D0%9F.pdf>

3. Хопунов Э. А. Новый взгляд на процессы переработки минерального сырья. *Консультационно-аналитический центр "Российский стандарт"*. Получено из <http://technology.snauka.ru/2015/03/5944>

4. Ласкорин Б. Н., Барский Л. А., Персиц В. З. Безотходная технология минерального сырья. *Системный анализ*. Москва: Недра. 1984. 334 с.

5. Ревнивцев В. И., Азбель Е. И., Баранов Е. Г., Изойтко В. М., Крапивский Е. И., Кротков М. И., Леман Е. П., Петров А. С. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке. Москва: Недра. 1987. 307 с.

6. Хопунов Э. А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья. Екатеринбург: УИПЦ. 2013. 429 с.

7. Хопунов Э. А. Теория и практика избирательной переработки минерального и техногенного сырья. Москва: Нобель Пресс .Lennex Corp. 2014.

8. Хопунов Э. А. Анализ причин низкой энергоэффективности процессов разрушения минерального сырья. *Современная техника и технологии*, 2014. № 10. С. 42–51.

9. Бабков В. Ф., Безрук В. М. Основы грунтоведения и механики грунтов. Москва. Высшая школа. 1976. 239 с.

10. Павлиш В. Н., Назимко Е. И., Тарабаева И. В., Науменко В. Г., Перинская Е. В. Математическое моделирование процессов обезвоживания обогащенного минерального сырья. *Донецкий национальный технический университет*. 2013.

11. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Результаты разделения по крупности и обезвоживания строительных песков новым способом. *Геотехническая механика*

ка. *Межведомственный сборник научных трудов ИГТМ НАН Украины*. 2013. Вып. 109. С. 63–73.

12. Шевченко А. И. Анализ кинетики разделения по крупности и обезвоживания угольных шламов при новом способе виброударного грохочения. *Збагачення корисних копалин. Науково-технічний збірник. Національної гірничої академії України*. 2013. № 55(96). С. 96–103.

13. Шевченко А. И. Интенсификация разделения по крупности и обезвоживания угольных шламов при виброударном грохочении. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2016. № 2. С. 100–105.

14. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Анализ состояния развития вибрационного грохочения при обезвоживании минерального сырья. *Геотехническая механика. Межведомственный сборник научных трудов ИГТМ НАН Украины*. 2013. № 101. С. 84–104

15. Надутый В. П., Сухарев В. В., Костыря С. В. Результаты комплексного обезвоживания горной массы на вибрационном устройстве. *Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2014. Випуск 1(73). С. 88–93.

16. Shevchenko V., Shevchenko G., Lebed G. Guidelines for the application of resource-saving technologies and means of fine classification by size and dehydration of uranium ore waste. *Mining of Mineral Deposits*, 2016. № 10(1). Pp. 69–76.

17. Bulat A., Shevchenko G., Shevchenko V., Shlyakhova M. Vibratsionnyie polichastotnyie grohotyі v tehnologiyah pererabotki tonkih fraktsiy mineralnogosyirya. *Scientific and technical support for mining production: D.A. Kunaev IGD*, 2014. № 86. Pp. 112–118.

18. Shevchenko G., Shevchenko V., Bobylev A. Вибрационные грохоты с плечастотными колебаниями просеивающих поверхностей для тонкого разделения. *Уголь Украины*. 2013. Вып. 2(674). С. 23–27.

19. Шевченко Г., Шевченко В, Шляхова М, Лебедь Г. Резонансы виброударных систем. *Геотехническая механика. Межведомственный сборник научных трудов ИГТМ НАН Украины*. 2015. Вып. 121. С. 28–38.

20. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Математическое моделирование кинетики обезвоживания при вибрационном грохочении. *Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2011. Вип. 4(64). С. 20–24.

21. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Математическое моделирование кинетики грохочения и обезвоживания минерального сырья. *Науково-технічний збірник Збагачення корисних копалин Національного гірничого університету України*. 2012. Вип. 51(92). С. 55–64.

22. Шевченко А. И. Численные эксперименты по изучению обезвоживания минерального сырья при виброударном грохочении. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. Вип. 6 (113). С. 70–78.

23. Шевченко А. И. Численные эксперименты по изучению кинетики грохочения с обезвоживанием минерального сырья при виброударном грохочении. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2019. Вип. 1(114). С. 62–73.

**THE INFLUENCE OF THE PROPERTIES OF MINERAL PARTICLES
ON THE TECHNOLOGY AND EQUIPMENT PARAMETERS
IN THE EXTRACTION OF USEFUL COMPONENTS FROM TAILING DUMPS**

A. Shevchenko

N. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine

vul. Simferopolskaya, 2a, Dnepr, 49005, Україна. E-mail: alex-tpm@ukr.net

Purpose. The aim of the work is to study the influence of the properties of mineral particles on the technology and equipment parameters in the extraction of useful components from tailings dumps. **Methodology.** Synthetic of research results using computer simulation methods has been used. **Findings.** The choice of rational technology and equipment for the extraction and enrichment of waste mining and processing of minerals stored in storage tanks (tailings), must be made taking into account the properties of raw materials: particle size, humidity, amount of useful component and waste (for example, in coal slimes - the amount of carbon and ash in classes), etc. The processed raw materials have a complex particle size distribution, therefore the properties of the raw materials vary considerably depending on the particle size. Water-holding capacity of materials depends on the specific surface of the particles and on the energy spent on interaction with water. The greatest difficulties are caused by dehydration of fine and small particles, since products formed from them, retain significant amounts of water due to the highly developed surface of the particles, actively interacting with water, and acting capillary and electrostatic forces. To overcome the particles of forces acting from the fluid, affect the geometric parameters of the particle, its density, surface tension, density and viscosity of the liquid; wetting angle; vibration amplitude and frequency. **Originality.** To improve the efficiency of the separation process by size and dehydration, a new method of vibro-impact screening was proposed. It was established by experiments that the use of a new method in the processing of raw materials, which is practically not classified and dehydrated by traditional methods, allows to increase the extraction class -0.1 mm to 75–85%, and the moisture content of the super lattice material to 6–8%. **Practical value.** Developed methods for calculating the rational parameters of these processes. **Conclusions.** The use of technology, including fine classification with dehydration, in the processing of waste will allow you to: expand the resource base and increase the economic efficiency of mining and processing enterprises; significantly improve the environmental situation in the mining and processing regions.

Key words: particle size, properties, particles, moisture, separation by size, dehydration, vibro-impact screening.

REFERENCES

1. Brodskaya, R. L. (2016). Ontogenicheskiy analiz na mikro- i nanourovne mineralnykh individov i agregatov dlya restavratsii usloviy rudoobrazovaniya i otsenki tekhnologicheskikh svoystv mineralnogo syrya. Retrieved from <http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/viewFile/46/47>
2. Naumenko, V. G. (2014). Metodika issledovaniya kharakteristik tonko-dispersnykh uglesoderzhashchikh osadkov, imeyushchikh znacheniyе dlya

mekhanicheskogo obezvozhvaniya. *Donetskiy natsionalnyy tekhnicheskiiy universitet*. Retrieved from <http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/30415/1/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F%20%D0%B2%20%D0%A1%D0%9F.pdf>

3. Khopunov, E. A. (2015). Novyy vzglyad na protsessy pererabotki mineralnogo syrya. *Konsultatsionno-analiticheskiy tsentr Rossiyskiy standart*. Retrieved from <http://technology.snauka.ru/2015/03/5944>

4. Laskorin, B. N., Barskiy, L. A., Persits, V. 3. (1984). Bezotkhodnaya tehnologiya mineralnogo syrya. *Sistemnyy analiz. Moskva: Nedra*.

5. Revnivtsev, V. I., Azbel, Ye. I., Baranov, Ye. G., Izoitko, V. M., Krapivskiy, Ye. I., Krotkov, M. I., Leman, Ye. P., & Petrov, A. S. (1987). Podgotovka mineralnogo syrya k obogashcheniyu i pererabotke. *Moskva: Nedra*.

6. Khopunov, E. A. (2013). Selektivnoye razrusheniye mineralnogo i tekhnogenogo syrya. *Yekaterinburg: UIPTS*.

7. Khopunov, E. A. (2014). Teoriya i praktika izbiratelnoy pererabotki mineralnogo i tekhnogenogo syrya. *Moskva: Nobel Press. Lennex Corp*.

8. Khopunov, E. A. (2014). Analiz prichin nizkoy energoeffektivnosti protsessov razrusheniya mineralnogo syrya. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*, no. 10, pp. 42- 51.

9. Babkov, V. F., Bezruk, V. M. (1976). Osnovy gruntovedeniya i mekhaniki gruntov. *Moskva. Vysshaya shkola*.

10. Pavlish, V. N., Nazimko, Ye. I., Tarabayeva, I. V., Naumenko, V. G., & Perinskaya, Ye. V. (2013). Matematicheskoye modelirovaniye protsessov obezvozhvaniya obogashchennogo mineralnogo syrya. *Donetskiy natsionalnyy tekhnicheskiiy universitet*.

11. Lapshin, Ye. S., Shevchenko, A. I. (2013). Rezultaty razdeleniya po krupnosti i obezvozhvaniya stroitelnykh peskov novym sposobom. *Geotekhnicheskaya mekhanika, Mezhdovedomstvennyy sbornik nauchnykh trudov IGTM NAN Ukrainy*, issue 109, pp. 63-73.

12. Shevchenko, A. I. (2013). Analiz kinetiki razdeleniya po krupnosti i obezvozhvaniya ugolnykh shlamov pri novom sposobe vibroudarnogo grokhocheniya. *Zbahachennyya korysnykh kopalyn. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk, Natsionalnoyi hirnychoyi akademiyi Ukrayiny*, no. 55(96), pp. 96-103.

13. Shevchenko, A. I. (2016). Intensifikatsiya razdeleniya po krupnosti i obezvozhvaniya ugolnykh shlamov pri vibroudarnom grokhochenii. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no. 2, pp. 100-105.

14. Lapshin, Ye. S., Shevchenko, A. I. (2013). Analiz sostoyaniya razvitiya vibratsi-onnogo grokhocheniya pri obezvozhvanii mineralnogo syrya. *Geotekhnicheskaya mekhanika, Mezhdovedomstvennyy sbornik nauchnykh trudov IGTM NAN Ukrainy*, issue 101, pp. 84-104.

15. Naduty, V. P., Sukharev, V. V., Kostyrya, S. V. (2014). Rezultaty kompleksnogo obezvozhvaniya gornoy massy na vibratsionnom ustroystve. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh, Vseukrayinskyy naukovo-tekhnichnyy zhurnal*, issue 1(73), pp. 88-93.

16. Shevchenko, V., Shevchenko, G., Lebed, G. (2016). Guidelines for the application of resource-saving technologies and means of fine classification by size and dehydration of uranium ore waste. *Mining of Mineral Deposits*, issue 10(1), pp. 69-76.
17. Bulat, A., Shevchenko, G., Shevchenko, V., & Shlyakhova, M. (2014). Vibratsi-onnyie polichastotnyie grohotyi v tehnologiyah pererabotki tonkih fraktsiy mineralnogo syriya. *Scientific and technical support for mining production: D.A. Kunaev IGD*, no. 86, pp. 112-118.
18. Shevchenko, G., Shevchenko, V., Bobylev, A. (2013). Vibratsionnyie grohotyi s polichastotnyimi kolebaniyami proseivayuschih poverhnostey dlya tonkogo razdeleniya. *Coal of Ukraine*, no. 2(674), pp. 23-27.
19. Shevchenko, G., Shevchenko, V., Shlyakhova, M., & Lebed, G. (2015). Rezonansyi vibroudarnyih sistem. *Geotekhnicheskaya mekhanika, Mezhdvostvennyy sbornik nauchnykh trudov IGTM NAN Ukrainy*, issue 121, pp. 28-38.
20. Lapshin, Ye. S., Shevchenko, A. I. (2012). Matematicheskoye modelirovaniye kinetiki obezvozhvaniya pri vibratsionnom grokhochenii. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh, Vseukrayinsky naukovo-tekhnichnyy zhurnal*, issue 4(64), pp. 20-24.
21. Lapshin, Ye. S., Shevchenko, A. I. (2012). Matematicheskoe modelirovanie kinetiki grohocheniya i obezvogivaniya mineralnogo syriya. *Zbahachennya korysnykh kopalyn. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk, Natsionalnoyi hirnychoyi akademiyi Ukrayiny*, no. 51(92), pp. 55-64.
22. Shevchenko, A. I. (2018). Numerical experiments on the study of the dehydration of mineral raw materials with vibro-impact screening. *Visnik Kremenchutskogo natsionalnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo*. Issue 6 (113). pp. 70–78.
23. Shevchenko, A. I. (2019). Numerical experiments to study the kinetics of screening with the dehydration of mineral raw materials with vibroimpact screening. *Visnik Kremenchutskogo natsionalnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo*. Issue 1(114). pp. 62–73.

Стаття надійшла 29.04.2019.