

Д-р техн. наук Е.С. Лапшин,  
канд. техн. наук А.И. Шевченко  
(ИГТМ НАН Украины)

## **АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОЧЕНИЯ ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Приведен обзор технических решений вибрационных грохотов и сравнение показателей их работы с известными методами обезвоживания минерального сырья. Предложены варианты развития подобных аппаратов в институте геотехнической механики Национальной академии наук Украины.

## **ANALYSIS OF THE CONDITION OF DEVELOPMENT VIBRATING SCREENING AT DEHYDRATION OF MINERAL RAW MATERIALS**

The review of technical solutions vibrating screens and comparison of indicators of their work with known methods of dehydration of mineral raw materials is provided. Options of development of similar devices at institute of geotechnical mechanics of National academy of Sciences of Ukraine are offered.

Во многих отраслях применяют процессы обезвоживания. Поэтому проблемой обезвоживания занимаются многие специалисты Украины и зарубежья, среди которых: Национальный горный университет, Гипромашуглеобогащение, УкрНИИуглеобогащение, Гипромашобогащение, Институт геотехнической механики НАН Украины им. Н.С. Полякова (ИГТМ НАН Украины), Механобрчермет (Россия), фирмы: "Шенк" и "Уде" (Германия), "Репифайн" и "Деррик" (США), "Фурукава" (Япония), "Круш" (Израиль), и др.

В данной работе рассматриваются опыт и предложения по обезвоживанию продуктов обогащения на вибрационных грохотах, а также их целесообразность и техническая возможность. Актуальность исследований и анализа опыта связаны с потребностью снижения содержания влаги в тонких классах до кондиционных норм, а также с недостаточной изученностью свойств исходного сырья, отсутствием возможности управления процессом разделения в зависимости от физико-механических свойств исходного материала и научной базы для выбора техники и обоснования технологии обезвоживания сырья.

Цель работы – анализ технических решений по обезвоживанию продуктов обогащения на вибрационных грохотах и области их использования.

Классификация видов грохочения выполнена в [1].

В работах [2,3] показано, что при тонком и особо тонком грохочении доминирующую роль играют силы поверхностного натяжения, действующие на границе фаз. Для эффективного обезвоживания необходимо преодолеть эти силы, например за счет разрежения под ситом или увеличения ускорения.

Однако увеличить ускорения не позволяет прочность корпуса грохота.

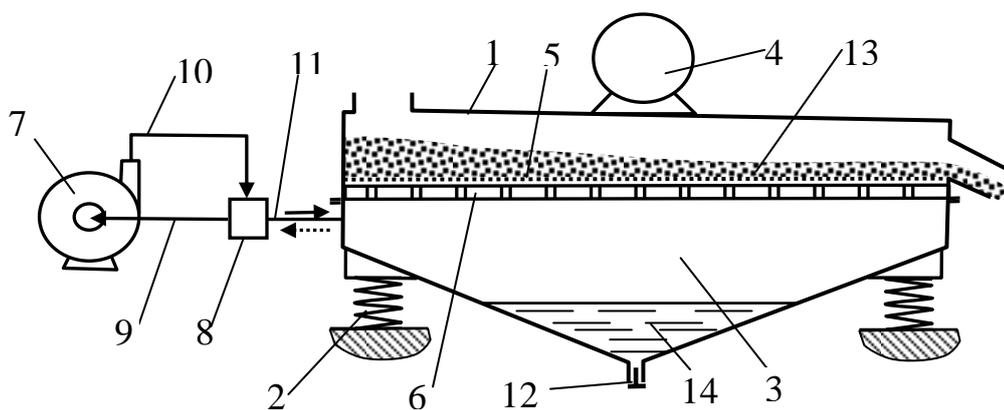
Представляется перспективным для увеличения ускорения импульсное воздействие за счет виброудара непосредственно по ситум или через промежуточный элемент.

Довольно-таки подробный обзор конструкций грохотов и просеивающих поверхностей приведен в монографии [4]. В нем, однако, недостаточно полно отражены конструкции, в которых используются разрежение под ситом и поли-

частотное возбуждение, что особенно важно при тонком и особо тонком грохо-  
чении.

Рассмотрим конструкции грохотов, позволяющие преодолевать капилляр-  
ные силы.

Фирмой Деррик для повышения эффективности обезвоживания предложено  
под просеивающей поверхностью создавать разрежение [5]. Схема грохота  
представлена на рис. 1. Грохот состоит из рамы 1, установленной на упругих  
связях 2, поддона 3, вибровозбудителя 4, сита 5, решетки 6, центробежного  
вентилятора 7, распределителя 8, трубопроводов 9, 10, 11 и клапана 12. Решетка  
6 поддерживает сито 5 и в ней отверстия значительно больше чем в сите. Вход  
и выход вентилятора 7 соответственно соединены трубопроводами низкого 9 и  
высокого давления 10 с распределителем 8, который в свою очередь трубопро-  
водом 11 соединен с поддоном 3. По длине сита могут быть установлены не-  
сколько поддонов.



1 – подвижная рама; 2 – упругие связи; 3 – поддон; 4 – вибровозбудитель;  
5 – сито; 6 – решетка; 7 – центробежный вентилятор; 8 – распределитель;  
9 – трубопровод низкого давления; 10 – трубопровод высокого давления;  
11 – трубопровод; 12 – клапан; 13 – грохотимое сырье; 14 – подрешетный продукт  
Рис. 1 – Схема грохота фирмы Деррик [5].

Вибровозбудитель 4 сообщает раме 1 колебания, под действием которых  
сырье 13, содержащее воду, перемещается по ситам 5, сегрегирует и просеивает-  
ся. В результате работы центробежного вентилятора 7, воздушный поток от ко-  
торого управляется распределителем 8, под ситом 5 периодически чередуются  
разрежение и повышенное давление. При пониженном давлении жидкость вме-  
сте с мелкими частицами проходит через отверстия сита 5 и собирается в под-  
доне 3. При

повышенном давлении происходит самоочистка сита 5, дополнительно раз-  
рыхляется сырье 13 и открывается клапан 7 – подрешетный продукт 14 вытека-  
ет из поддона 3. Давление воздуха и его периодичность изменения задается си-  
стемой управления, которая на схеме условно не показана.

Могут использоваться сита с отверстиями от 38 до 325 меш. Рекомендуемый  
диапазон перегрузки от 3 до 12 г. Максимальное значение разрежения и повы-  
шенного давления находится в пределах от 152,4 до 254 мм водяного столба.

Грохоты фирмы Деррик работают эффективно до тех пор, пока вся просеи-

вающая поверхность заполнена водой. Но как только на ней появляются обезвоженные участки, в толще материала возникают воздушные каналы, вентилятор начинает "тянуть" воздух и процесс обезвоживания резко ухудшается.

Для повышения ускорения, сообщаемого грохотимому материалу, фирмой "Ревум" предложен грохот с непосредственным возбуждением сита [6]. На рис. 2 приведена схема грохота. На неподвижном коробе 1 закреплены сетка 2 и электромагнитные вибровозбудители 3 (на схеме условно показаны только два вибровозбудителя). Под ситом в блок-шарнирах 4 установлены валы 5, к которым прикреплены рычаги 6 и ударники 7. Для уменьшения нагрузки на вибровозбудитель ось симметрии вала на участке между боковинами короба смещена относительно оси участков вала, которые находятся в блок-шарнирах.

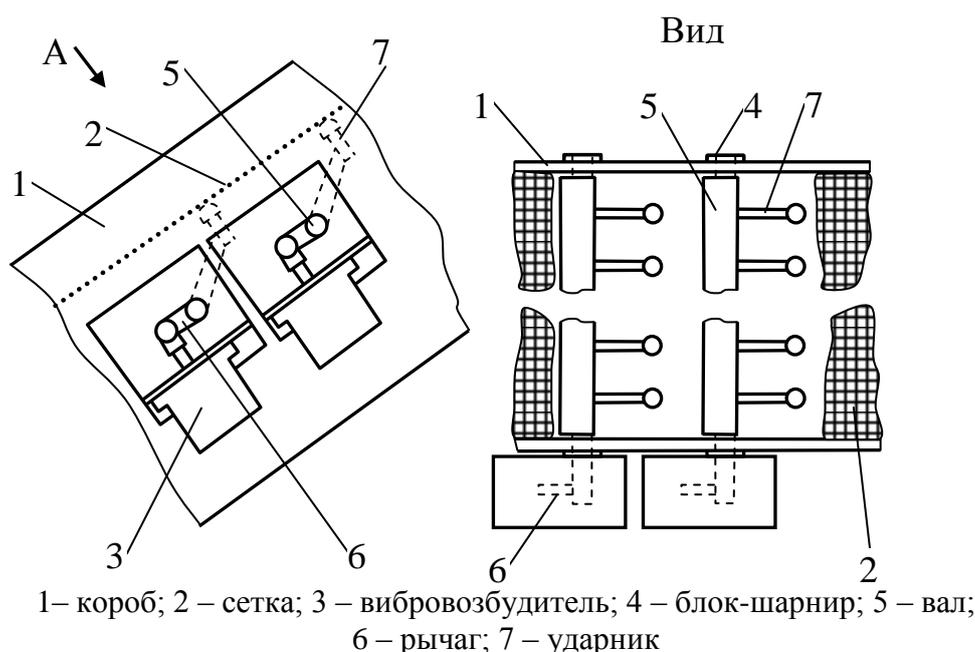


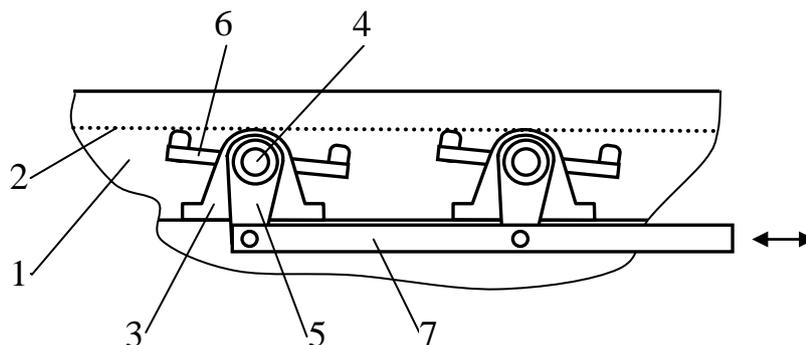
Рис. 2 – Грохот с непосредственным возбуждением фирмы "Ревум" [6].

Возмущения от вибровозбудителя 3 через рычаг 6 передаются валу 5, а от него ударникам 7, которые и воздействуют непосредственно на сетку 2. Большие ускорения способствуют повышению эффективности грохочения. В патенте приводится вариант исполнения, в котором все рычаги 6 соединены тягой, которая приводится в движение одним дебалансным вибровозбудителем.

В грохоте фирмы "Ревум" при обезвоживании используют "одиночные удары" – режимы, когда материалу находящемуся на просеивающей поверхности сообщают импульс, обеспечивающий его отрыв и разрыхление. Следующий импульс наносится, когда материал возвращается обратно. Однако, как показала практика, этот же материал препятствует удалению воды с просеивающей поверхности, удерживаемой силами поверхностного натяжения, а также очистке ее от застрявших частиц, что снижает эффективность обезвоживания. Поэтому очистку просеивающей поверхности необходимо осуществлять на этапе полета материала. В грохоте фирмы "Ревум" эти вопросы не решены, т.к. энергии собственных колебаний просеивающей поверхности недостаточно для

очистки ее от воды и частиц, поэтому эффективность их невысока.

На рис. 3 приведен фрагмент грохота с рычажным ударным механизмом для возбуждения просеивающей поверхности [7].



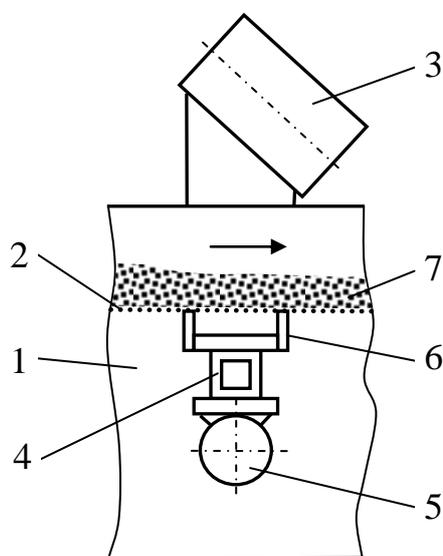
1 – короб; 2 – просеивающая поверхность; 3 – опора; 4 – вал; 5 – приводной рычаг;  
6 – ударный рычаг; 7 – шатун

Рис. 3 – Грохот с рычажным ударным механизмом [7].

На неподвижном корпусе 1 грохота закреплена просеивающая поверхность 2. Снизу ее установлены ударные механизмы, каждый из которых состоит из опор 3, расположенных за пределами просеивающей поверхности, вала 4, приводного 5 и ударного 6 рычага. Приводные рычаги 5 соединены шарнирно с шатуном 7. Шатун приводится в движение эксцентриковым вибровозбудителем, который условно не показан. В конструкции предусмотрено регулирование амплитуды и частоты вибровозбуждения. За один оборот эксцентрика ударные рычаги своими краями наносят два удара по просеивающей поверхности, причем удары смещены по ходу движения материала, что уменьшает забивание и износ просеивающей поверхности.

Грохотам этой конструкции также присущи недостатки грохотов фирмы "Ревум", поэтому не удастся повысить эффективность обезвоживания.

На рис. 4 показан фрагмент грохота по патенту [8].



1 – короб грохота; 2 – просеивающая поверхность; 3 – низкочастотный вибровозбудитель; 4 – балка; 5 – высокочастотный вибровозбудитель; 6 – планка;  
7 – грохотимый материал; стрелка указывает направление движения материала

Рис. 4 – Фрагмент двухчастотного грохота [8]

На коробе 1 грохота закреплены просеивающая поверхность 2 и низкочастотный вибровозбудитель 3. Снизу просеивающей поверхности установлена балка 4, которая посредством упругих элементов (условно не показаны) соединена с боковинами короба 1. К балке 4 прикреплены высокочастотный вибровозбудитель 5 и планки 6, контактирующие с просеивающей поверхностью 2. Под просеивающей поверхностью установлено несколько балок с высокочастотными вибровозбудителями.

Низко и высокочастотные вибровозбудители соответственно обеспечивают колебания просеивающей поверхности с параметрами: частота 15–60 Гц и 16–116 Гц, амплитуда 1,58–4,76 мм и 0,25–0,381 мм. Воздействие на грохотимый материал 7 двух частот, по мнению авторов, снижает забивание отверстий просеивающей поверхности. Приводится следующее объяснение. Высокая частота обеспечивает многократное соударение частицы со стенками отверстиями, что препятствует заклиниванию, а низкая частота способствует выбросу частиц из отверстия.

К недостаткам двухчастотного грохота следует отнести низкую эффективность при обезвоживании мелких и тонких классов крупности. Это является следствием того, что циркуляция влажного материала приводит к его окомкованию, прилипанию частиц вследствие действия сил адгезии и забиванию ячеек просеивающей поверхности, что снижает эффективность классификации и обезвоживания.

В Днепропетровском горном институте, а в дальнейшем в Институте геотехнической механики НАН Украины (ИГТМ НАН Украины) коллективом ученых (Червоненко А.Г., Дырда В.И., Надутый В.П., Равишин В.П., Плахотнюк Е.И., Тарасенко А.А.), работавших под руководством академика НАН Украины В.Н. Потураева были разработаны резонирующие ленточно-струнные сита (РЛСС) [9-19]. Отличительной особенностью сит РЛСС всех типоразмеров является возбуждение колебаний лент-струн сита за счёт резонансного эффекта. В результате высокой динамической активности сита надрешетный сыпучий материал превращается в виброкипящий слой. Происходит интенсивная его очистка, устраняется залипание. Сита показали высокую работоспособность при грохочении сухой и влажной горной массы (руд чёрных и цветных металлов, угля; известняков, кокса, гранитов и других различных строительных материалов). В настоящее время они широко используются на перерабатывающих предприятиях Украины и за ее пределами [20-23]. Однако, несмотря на указанные достоинства, эксплуатация грохотов выявила следующее.

На этих машинах также используют "одиночные удары". При тонком и особо тонком грохочении, а также материалов широкого спектра крупности отсутствие дополнительных ускорений на просеивающей поверхности приводит к недостаточному разрыхлению, налипанию материала, забиванию ячеек частицами и, как следствие, низкой эффективности грохочения. Поэтому такие грохота позволяют в зависимости от крупности снизить влажность минерального сырья только до 18–22 %.

В основу технологии вибрационного грохочения, разработанной фирмой

Kroosh Technologies Ltd, положена многочастотная нелинейная вибрационная система, в которой параметры вибровозбудителя, связей и подвижных элементов обеспечивают режим "странного аттрактора" [24]. В таком режиме просеивающая поверхность колеблется в поличастотном режиме, при котором усиливаются средние амплитуды просеивающей поверхности в 3–8 раз, а пиковые ускорения в 10–50 раз. Эффект "многомерного странного аттрактора" стабилизирует вибрационную систему в широком диапазоне частот.

Устройство, реализующее режим аттрактора, названо Kroosher<sup>R</sup>. Оно преобразует одночастотную вибрацию в многочастотную, многократно усиливает ее и передает сетке, равномерно распределяет энергию по всей поверхности с помощью бильных решеток. Вместе с тем обеспечивается высокая надежность машины, поскольку инерционные нагрузки на корпус грохота ниже, чем в обычных грохотах. Kroosher<sup>R</sup> или адаптер – чисто механическая система.

В традиционных грохотах вибровозбудитель, корпус и сетка жестко связаны. Корпус через упругую связь соединен с неподвижным основанием (рис. 5 а). В многочастотных грохотах вибровозбудитель жестко соединен с корпусом (рис. 5 б), который в свою очередь, соединен с наружной оболочкой адаптера. Внутренняя оболочка адаптера, посредством упругой связи, соединена с бильной решеткой, которая взаимодействует с сеткой или сеточной сборкой через одностороннюю упругую связь. Импульс, передаваемый бильной решеткой сеточной сборке, зависит от зазора между ней и бильной решеткой.

В процессах грохочения новая вибрационная система обеспечивает расширение области эффективного применения для просеивания мелких (менее 10 мм), тонких (менее 1 мм) и очень тонких частиц – вплоть до 45–75 микрон при высокой производительности и эффективности.

На рис. 6 приведена схема грохота фирмы Kroosh [25]. Грохот установлен на упругих опорах 1. К корпусу 2 грохота закреплены одночастотный вибровозбудитель 3 и сито 4. Под ситом 4 смонтированы интерфейс 5 и активирующий 6 элемент. Размер отверстий в интерфейсе больше размера отверстий в сите. Активирующий элемент 6 соединен с корпусом 1 посредством упругих связей 7. Каждая упругая связь 7 состоит из металлических втулок 8 и эластомерных ядер 9, которые осями 10 соединены с планками 11. Одна из втулок закреплена с активирующим элементом 6, а смежная – с кронштейном 12. За счет деформации эластомерных ядер 9 обеспечивается относительное движение активирующего элемента 6 и интерфейса 5. Упругие связи 7 имеют нелинейную характеристику сила-перемещение. При работе одночастотного вибровозбудителя 3 корпус 2 на упругих опорах 1 совершает колебательное движение. В результате переносного ускорения активирующий элемент 6 наносит удары по интерфейсу 5. Нелинейная характеристика упругих связей обеспечивает генерирование многочастотных колебаний при одночастотном возбуждении. Изгибная жесткость интерфейса выбирается такой, чтобы передать ударное ускорение в виде многочастотной вибрации ко всем частям сита 4, что позволяет увеличить разрыхление и просеивание сырья 13.

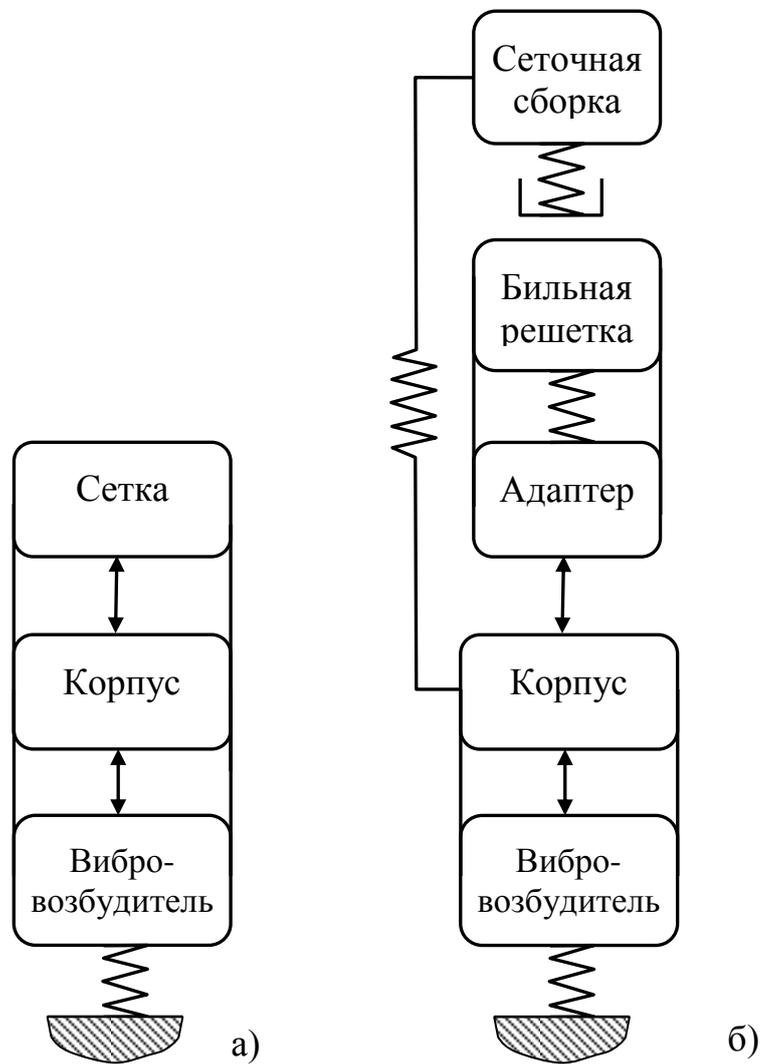
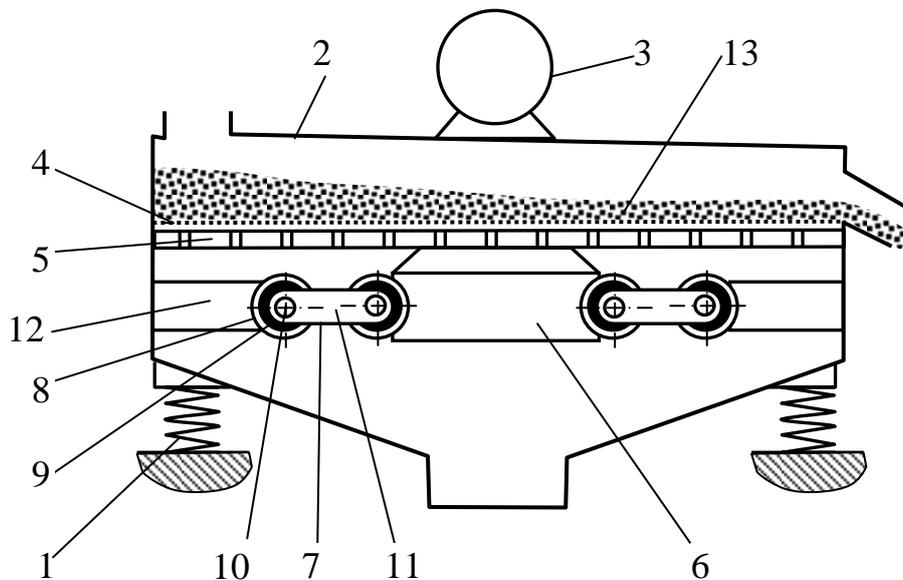


Рис. 5 – Структурные схемы грохотов.



1 – упругая опора; 2 – корпус; 3 – вибровозбудитель (750–3000 об/мин); 4 – сито; 5 – интерфейс; 6 – активирующий элемент; 7 – упругая связь; 8 – втулка; 9 – эластомерное ядро; 10 – ось; 11 – планка; 12 – кронштейн; 13 – сырье

Рис. 6 – Схема грохота фирмы Kroosh [10].

Таким образом, происходит преобразование одночастотной вибрации корпуса, возбуждающей одно или более сит, в последовательность механических импульсов, приложенных к интерфейсу, чтобы тем самым генерировать многочастотную вибрацию сита с сырьем.

Грохот может быть оснащен несколькими активирующими элементами с различными жесткостями упругих связей и с различной их пространственной ориентацией, что позволяет прикладывать к ситам импульсы под разными углами. При этом они могут быть разной продолжительности и амплитуды, а также могут иметь разные фазовые сдвиги по отношению к вибровозбуждению.

По данным работы [2] одночастотные (гармонические) колебания вибровозбудителя преобразуются в виброударные (негармонические) с пиками ускорений до 1000g и выше. При этом колебания на сите имеют сплошной спектр частот от 20 до 80 Гц и выше. Амплитуда колебаний сита находится в диапазоне 0,1–10 мм.

Технологические преимущества грохота фирмы Kroosh, который назвали "Идеальный грохот" (ИГ) достигаются за счет следующих явлений и процессов [26].

Когда слой частиц находится на поверхности сетки обычного вибрационного грохота, то все эти частицы находятся под воздействием одной внешней возбуждающей частоты – частоты (числа оборотов) мотора грохота. Частицы материала на грохоте имеют свою собственную частоту. Однако, поскольку все частицы, а их множество, находятся под воздействием одной и той же частоты, традиционный грохот распределяет их по поверхности сетки до тех пор, пока каждая частица не пройдет через одно из отверстий сетки.

Когда аналогичные частицы находятся на поверхности сетки многочастотного грохота ИГ каждая частица немедленно "находит" собственную резонансную частоту, поскольку на сите одновременно представлен широчайший диапазон частот, и распределение этих частот по поверхности сетки меняется десятки раз в секунду. В этом случае воздействие основной частоты мотора грохота вообще незаметно, поскольку энергия вибрации, сообщаемая сетке и находящемуся на ней материалу системой Kroosher® (Крушер®), в сотни раз больше той, которая сообщается непосредственно мотором. Отсюда – высокая производительность, поскольку каждая частица стремится пройти сквозь отверстие сетки, т. к. находится под влиянием внешней силы, воздействующей на эту частицу с частотой, совпадающей с собственной частотой этой частицы материала.

Эффект многочастотной вибрации становится ещё более очевиден при грохочении толстым слоем.

Когда такой слой лежит на поверхности сетки традиционного вибрационного грохота, масса материала подвергается только воздействию основной частоты мотора – и больше ничего. Число оборотов мотора низкое (760–1800 об/мин, очень редко 3000 об/мин), поэтому длина вибрационной волны, создаваемой мотором, довольно велика (поскольку длина волны обратно пропорциональна её частоте). Расчёты показывают, что длина волны составляет приблизительно 1 м, но ведь никто никогда не загружает на грохот материал слоем в 1 метр. Это

значит, что традиционный вибрационный грохот эффективно прорабатывает слой материала, располагающийся на высоте 1 метр от поверхности сетки, т.е. тот слой, которого просто не может быть.

На ИГ все частицы находятся под воздействием частот, совпадающих с их собственными частотами. Поскольку одновременно представлено огромное число частот, внутри слоя материала образуется соответствующее число волн разной длины. Это волны длиной, например, в 1 мм, 2 мм, 3 мм и т. д., то есть весь объём материала как бы "сканируется" и распределяется по соответствующим резонансным частотам. Сильные импульсы "простреливают" материал по всей глубине слоя, обеспечивая его постоянное перемешивание и эффективную обработку по всей толщине слоя. Материал "кипит" на поверхности сита. Создаётся эффект виброкипящего слоя, который позволяет эффективно прорабатывать толстый слой материала, что, в частности, приводит к очевидному повышению производительности.

Высокая эффективность ИГ достигается за счет следующего [26].

В лабораторных условиях на традиционном вибрационном грохоте мелкие частицы (подрешётный материал) из нижних слоев материала, прилегающих к поверхности сетки, проходят сквозь неё (если материал не залипает), а крупные частицы (надрешётный материал) остаются на поверхности сетки.

В промышленности поток материала на сетку и по ней идёт слоем определённой толщины. Мелкие частицы имеют тем меньше шансов достигнуть сетки и пройти сквозь нее, чем выше (в более высоком месте слоя материала) они были расположены с самого начала. Они начинают двигаться вместе с массой материала, и покидают грохот через выход надрешётного материала до того, как получают возможность добраться до сетки и пройти сквозь неё. Отсюда - низкая эффективность (присутствие в массе надрешётного материала частиц слишком большого количества мелких частиц, которые теоретически могли бы пройти сквозь сито).

На ИГ, постоянно перемешивающем слой материала, дело обстоит совершенно по другому. Каждая частица движется по собственной траектории, поскольку находится под воздействием собственной резонансной частоты. Поэтому между частицами появляются пустоты. В результате практически все мелкие частицы, способные пройти сквозь сито, не блокируются крупными, а свободно достигают поверхности сетки и проходят сквозь неё, даже если изначально находились в верхних слоях материала. Отсюда – очень высокая эффективность. Самоочистка сетки, разумеется, очень способствует повышению эффективности, поскольку все ячейки сетки всё время остаются открытыми.

Практический пример. Просеивание угольной суспензии на сетке 45 мкм. Традиционный грохот вообще не способен разделять угольную суспензию на сетке с отверстиями меньше 800 мкм из-за немедленного полного её забивания, а ИГ обеспечивает эффективность разделения на сетке 45 мкм от 70 до 94%, что на порядок выше эффективности работ с таким материалом на обычных грохотах даже с ситами в 800 мкм, и также на порядок выше эффективности гидроциклонов”.

Забивание сеток составляет 75–90% всех проблем грохочения [26]. Несмот-

ря на то, что грохочение является самым эффективным и дешёвым методом разделения по крупности (и самым дешёвым методом разделения вообще), его применение всегда ограничивалось областями, где забивание сеток не происходит благодаря большим размерам ячеек сетки или удобным характеристикам разделяемого материала. Значительное число процессов разделения проводятся мокрым способом, поскольку сухое грохочение невозможно именно из-за забивания сеток, что вызывает огромные дополнительные технологические трудности и расходы на организацию мокрого процесса и последующую сушку. Более того, существует огромное число процессов, где теоретически могли бы использоваться вибрационные грохоты, но от них отказались только из-за проблемы забивания сеток. Чем сложнее материал и/или меньше фракция, тем меньше у традиционного грохота шансов выполнить эту работу. Поэтому во многих случаях используются альтернативные, зачастую неудобные и дорогие устройства и методы, такие как гидроциклоны, воздушные классификаторы, центрифуги и т.д. Ускорения, сообщаемые сетке грохота Ultimate Screener™ составляют от 500 до 1000 g и даже более (где g – ускорение свободного падения, равное 9,8 м/с), в отличие от традиционных грохотов, которые создают ускорение не более 4–5 g (изредка 10–12 g). При столь высоком уровне g в комбинации с мощными импульсами, подаваемыми системой Kroosher® из-под сетки, у частицы нет возможности застрять в ячейке сетки, и забивания не происходит.

Различают три основные причины забивания сеток: застревание в ячейках частиц неправильной формы и/или близких по размеру самой ячейке, липкий и/или влажный материал, агломерация. И далее рассмотрены каждая из указанных причин.

Частицы неправильной формы и/или близкие по размеру самой ячейке. На ИГ частица неправильной формы не может проникнуть глубоко в отверстие и застрять между проволочками, из которых сетка сплетена, поскольку мощные импульсы из-под сетки не дают такой частице возможности проникнуть глубоко в отверстие, "укрепиться" и застрять там. Когда частица ударяется о проволочку, она немедленно отбрасывается, и только те частицы, вектор движения которых направлен строго вниз или с небольшим отклонением от вертикальной оси, проходят сквозь отверстие. Очевидно, что если частица имеет неправильную форму и не соответствует отверстию по какому-нибудь из своих размеров, она ударяется о проволочку и отбрасывается. Аналогичная частица на обычном грохоте не подвергается воздействию никаких сильных импульсов. Под сеткой обычного грохота ничего нет. Сетка возбуждается только благодаря жёсткому прикреплению к корпусу грохота и сильному натяжению. Вибрация сетки слабая, и частицы неправильной формы легко проваливаются в отверстия и застревают там, блокируя их, уменьшая открытую область, и забивая в конечном итоге всю сетку, делая просеивание невозможным.

Практический пример. Просеивание кварцевого песка, материала, известный своей труднопросеиваемой природой, поскольку частицы, из которых он состоит, имеют неправильную форму. ИГ просеивает на 100 мкм, 150 мкм, 200 мкм, то есть фракции, недоступные для обычных грохотов. Производительность – 7–

8 т/час на м<sup>2</sup>, т.е. такая же, которую демонстрируют обычные грохоты при ситах, измеряемых в миллиметрах, а не микронах.

То же самое относится и к липкому материалу, поскольку энергия, прилагаемая к поверхности сетки, намного превосходит силу, с которой материал прилипает к поверхности. Импульсы с ускорением в сотни g в комбинации с высокой амплитудой (10 мм против 2–3 мм на обычном грохоте) эффективно предотвращают забивание (залипание) сетки просеиваемым материалом.

Практический пример. Просеивание влажного известняка (влажность 3 %). Для обычного грохота эта задача невыполнима при использовании сеток меньше 8 мм. Производительность обычного грохота 4–5 т/час на м<sup>2</sup>. ИГ разделяет на сетке 2 мм с такой же производительностью, и разделяет до 1 и 0,5 мм, то есть в 16 раз тоньше, с производительностью 2–3 т/час на м<sup>2</sup>.

Агломерация – это склеивание отдельных частиц материала, формирующих шарик, ведущий себя как единый объект. На традиционном грохоте при вибрации одночастотного характера все частицы, из которых состоит агломерат, находятся под воздействием одной частоты. Поэтому агломерат движется по поверхности сетки как единый объект, и, в конце концов, разгружается через выход надрешётного материала, хотя на самом деле это продукт, который можно было бы разделить. Потери продукции от этого эффекта в мировой промышленности просто огромны. Кроме того, агломераты засоряют и блокируют отверстия сетки, поскольку они достаточно тяжелы, и слабая одночастотная вибрация не всегда в состоянии их удалить. На ИГ присутствуют импульсы с энергией очень высокого порядка и исключительно редко может случиться, что энергия взаимного притяжения частиц какого-либо агломерата превысит энергию, сообщаемую системой Kroosher®. С одной стороны, мощные импульсы из-под сетки разбивают агломерат на более мелкие части. С другой стороны, каждая частица внутри агломерата, оказываясь под воздействием собственной резонансной частоты, двигается по своей собственной траектории, отличной от траекторий смежных частиц. Вследствие этого агломерат больше не может вести себя как единый объект и распадается.

Практический пример. Просеивание полевого шпата. Один из клиентов KROOSH Technologies просеивал этот материал в течение 20 лет. Обратился в KROOSH Technologies, чтобы повысить производительность. Исходный материал состоял из 70 % подрешётного материала (продукт) и 30 % надрешётного материала (балласта). После просеивания на ИГ оказалось, что почти 100% материала проходит сквозь сито, то есть всё, что раньше считалось балластом, на самом деле являлось агломератами, которые могли быть разбиты на грохоте ИГ и просеяны. Клиент в течение 20 лет попросту выбрасывал 30 % продукта.

Несколько типичных примеров работы ИГ. Материал - кофейная гуща. Пищевой продукт. Жидкая масса. Разделение по фракциям – 27 мкм и 15 мкм. Из-за сильного залипания традиционные грохота вообще не могут работать с этим материалом с ситами мельче 200 мкм. Для обезвоживания материала и возвращения его части в работу клиент использовал центрифугу. Степень обезвоживания материала центрифугой – 50 %. Эффективность возврата материала в производственный процесс – 30 %. Рядом с центрифугой установили ИГ с си-

том 27 мкм. Степень обезвоживания материала – 65 %. Эффективность возврата материала в производственный процесс – 90 %. Через некоторое время центрифугу заменили на ИГ с ситом 15мкм. Степень обезвоживания – 70%. Эффективность возврата – 95%. Материал – ТЕВІS (тетрабромобисфенол А)”.

Авторы [27] отмечают, что до создания ИГ в мире не существовало технологий, позволяющих качественно и экономически оправданно разделять уголь, прошедший через процесс мокрого размола на шаровых и прочих мельницах (угольная пульпа), на фракции меньше чем 500 мкм. Вследствие этого от 10 до 15 процентов угля попросту выбрасывается в отвалы, снижая коэффициент полезного использования исходного материала, увеличивая затраты и представляя серьёзную экологическую проблему.

В настоящее время ИГ работают в угольной промышленности Южной Африки и Австралии, получены заказы на поставку на угольные предприятия Турции, Испании и США. Результаты работы грохотов в промышленных условиях приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Технологические показатели классификации угля на ИГ

Крупность разделения, мкм	Удельная производительность, м <sup>3</sup> /(ч·м <sup>2</sup> )	Эффективность, %
45	25	88
55	30	90
100	60	90
150	90	89
355	170	92

По данным [28-30] ИГ сам по себе обеспечивает достаточно сильную степень обезвоживания.

Кроме ИГ фирмой KROOSH Technologies Ltd. (КРУШ Текнолоджиз Лтд.) разработана специализированная машина – идеальный обезвоживатель (ИО). По сравнению с ленточным пресс-фильтром ИО демонстрирует несколько меньшую степень обезвоживания. Так, при обезвоживании пульпы с размерами частиц 0–150 мкм, ленточный пресс-фильтр показывает результат 20 % общей остаточной влажности, тогда как ИО обезвоживает до общей остаточной влажности в 22 %. Однако, ленточный пресс-фильтр – это аппарат прерывистого действия, непригодный для эксплуатации в условиях реального промышленного производства с большими объёмами материала. Технология работы с ленточным пресс-фильтром предполагает порционную загрузку и разгрузку рабочей камеры, и очистку фильтровочных секций после каждого раза. В отличие от этого, ИО – машина непрерывного действия, процесс загрузки, обезвоживания и разгрузки в которой происходит без участия оператора и безостановочно.

Сравнение ИО происходило с наиболее технически совершенными центрифугами, работающими на угольных предприятиях Южной Африки, а именно с ковшовыми центрифугами и сеточно-ковшовыми центрифугами.

Обезвоживать пульпу, содержащую мелкие фракции, может только такая центрифуга. Более простые и дешёвые осадительные, конусные и пр. центрифуги обладают значительно меньшими возможностями. Однако даже ковшовая

центрифуга не в состоянии обезвоживать угольную пульпу с частицами 0–150 мкм. Для того чтобы хоть как-то обезвоживать такой материал, в ковшовую центрифугу подаётся смесь из 30–40 % мелкого угля и 60–70 % крупного, где размер частиц приближается к 500 мкм. Для обеспечения центрифуги таким материалом строятся целые линии циклонов и спиральных сепараторов, единственной целью которых является обеспечение центрифуги приемлемым для обезвоживания гранулометрическим составом угольной пульпы. При процентном соотношении мелкого и более крупного материала 30/70 ковшовая центрифуга способна обезвоживать до 13–14 % остаточного содержания влаги. Без такого смешивания фракций центрифуга не способна обезвоживать угольную пульпу совсем. Тот материал, который недоступен для обезвоживания на центрифуге, ИО обезвоживает до 22 % общей остаточной влажности.

При повышении крупности материала подаваемого в ИО, улучшаются и показатели обезвоживания, т. е. снижается остаточное содержание влаги. Крупные угли обезвоживаются до 8, 7 и менее процентов.

ИО основана на многочастотной технологии и создана для обезвоживания жидких материалов, например, угольной пульпы.

В промышленности нет приемлемых способов обезвоживания угольной пульпы. Центрифуга технически не может обезвоживать мелкий уголь (от 150 до 500 мкм), если в нем содержится более 30 % мелких частиц (ближе к 150 мкм). Для разделения на <math>-150</math> мкм центрифуга вообще бесполезна. В процессе обнаруживается естественный дефицит крупного угля, поскольку крупный уголь можно обезвоживать, а высадки – нет, что делает процесс ещё менее эффективным. Лучший результат, которого может достичь центрифуга со специально подготовленным углем (смесью с большими частицами) – это 20 % остаточной влажности, что превышает необходимый уровень 12–14 % (а каждый процент значительно влияет на рыночную стоимость угля). Ленточные пресс-фильтры могут обезвоживать до 15–16 %, но они не могут использоваться в промышленном производстве с большими объемами из-за невозможности обеспечения непрерывного процесса на этих устройствах.

Традиционные грохоты даже не рассматриваются как альтернатива. Есть еще один метод – сушка, которая позволяет достигнуть любого необходимого остаточного содержания влаги, даже 0 %, но сушка 1 тонны угля на сушильном аппарате требует больше энергии, чем может быть получено при сжигании этой тонны. Это делает сушку экономически неприемлемой.

ИО использует сильную многочастотную вибрацию, гораздо более сильную, чем ИГ. Механическими средствами (вибрацией) ИО обезвоживает глубже, чем центрифуга, до 18–19 %. Даже самый плохой жидкий материал с частицами менее 150 мкм, которые центрифуга вообще не может обезвоживать, ИО механически обезвоживает до 25–26 % остаточной влажности. Однако 18 % – это недостаточно, нужно процентов 12–14. Поэтому ИО включает в себя и сушилку. Но этот процесс в корне отличается от традиционной сушки. При обычной сушке используют мощный поток горячего воздуха, чтобы "продавить" горячий поток газов через весь слой угля на машине. Сжатый воздух – это очень дорогая технология. Кроме того, уголь обезвоживается неоднородно, верхние и мелкие ча-

стицы становятся абсолютно сухими раньше, в то время как крупные частицы и те, что расположены глубже, сохраняют воду дольше. Из-за этого получается большое количество пересушенных частиц, которые поднимаются на поверхность материала, потому что они легче и подхватываются потоком горячего воздуха. Эти частицы взрывоопасны, поэтому требуется применение дорогих мер безопасности, установки циклонов для улавливания таких частиц и т.д. И, наконец, обезвоживание горячим воздухом не имеет смысла с экономической точки зрения. ИО использует слабый поток воздуха. На самом деле это даже не воздух, а рабочий газ, полученный в результате сгорания самого угля. Для обезвоживания 1 тонны угля до определенной необходимой остаточной влажности Ultimate Dewaterer™ тратит только 20 кг угля, т. е. 2 %. Причём используется бросовый уголь, хвосты, которые в любом случае ранее не использовались. Это стало возможным благодаря многочастотной вибрации, которая создает толстый "кипящий слой". Частицы угля зависают в воздухе, между ними открываются пустоты, и горячий газ свободно обтекает каждую частицу со всех сторон. Все слои угля постоянно перемешиваются, и поэтому все частицы обезвоживаются в одинаковой степени. В ИО нет пересушенных и, наряду с ними, всё ещё влажных частиц. Не требуются никакие компрессоры, в машине работает простой вентилятор. Не нужны циклоны. Нет опасности взрыва, потому что степень обезвоживания контролируется, и она одинакова для всех частиц.

ИО позволяет использовать уголь, который ранее выбрасывался в отвалы. ИО также позволяет значительно снизить затраты на обезвоживание грубых угольных фракций, которые современной промышленностью обезвоживаются другими, более дорогими способами. Очевидно, что применение ИО не ограничивается обезвоживанием угля.

Опыт применения ИО для нерудных материалов описан в работе [31].

Грохоты (ИГ) и обезвоживатели (ИО) фирмы KROOSH Technologies Ltd. (КРУШ Текнолоджиз Лтд.) показали при эксплуатации хорошие технологические результаты. Однако, несмотря на это можно отметить следующие недостатки. В них также используются "одиночные удары", а это значит, что отсутствует возможность на этапе полета материала очистить просеивающую поверхность от воды и застрявших в ней частиц. Из-за этого невозможно дальнейшее повышение эффективности обезвоживания. Кроме того, использование в ИО рабочего газа приводит к дополнительным затратам энергии, что сказывается на себестоимости продукции.

Для дальнейшего повышения эффективности обезвоживания материалов необходимо интенсифицировать режим просеивающей поверхности (на этапе полета сырья) путем сообщения ей дополнительного ускорения без дополнительного подведения мощности. Это приведет к разрушению водной пленки в ячейке просеивающей поверхности, обусловленной поверхностным натяжением и вязкостью жидкости, что будет содействовать свободному прохождению тонких твердых частичек сквозь просеивающую поверхность вместе с жидкостью и обеспечивает высокую эффективность классификации тонкодисперсных материалов и обезвоживания.

Специалистами ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины также много вни-

мания уделяется вопросам повышения эффективности обезвоживания при тонком и особо тонком грохочении, о чем говорят выполненные за последнее время работы [32–44].

Ряд исследований посвящены определению режимных параметров грохота с РЛСС [37–39].

Для повышения эффективности грохочения был создан новый способ классификации и обезвоживания минерального сырья [37]. На грохоте устанавливали ленты-струны, имеющие разные собственные частоты колебаний, и частотный регулятор, который имел пределы регулирования, соответствующие собственным частотам всего набора лент-струн, с помощью которого сканировали режимы возбуждения лент-струн в пределах частот их собственных колебаний. Разные собственные частоты колебаний лент-струн обеспечивались их различной жесткостью или массой, или жесткостью и массой одновременно. Так как струны имеют различную частоту собственных колебаний, то при одном и том же возмущении соседние струны будут иметь разные амплитуды. Максимальная амплитуда будет у струны, собственная частота которой совпадает с частотой возмущений. В результате сканирования частотным регулятором максимальная амплитуда колебаний перемещается во времени и пространстве (по длине рабочей поверхности). Это способствует интенсивному разрыхлению материала. Поскольку частота собственных колебаний зависит и от присоединенной массы, находящейся на сите, которая имеет переменную величину, отдельные участки сита на практике имеют различную резонансную частоту собственных колебаний. Поэтому частотным регулятором сканируют режимы в пределах собственных частот струн с учетом присоединенной массы материала. Это позволяет предотвратить заклинивание частиц в ячейках просеивающей поверхности, улучшить разрыхление материала, вследствие чего происходит разрыв капиллярных мостиков и потеря устойчивости капиллярных менисков в ячейке сита, что интенсифицирует процесс классификации и обезвоживания.

Таким образом, интенсифицируется режим не всей массы короба, а только его просеивающей поверхности без дополнительного подведения мощности. Тем не менее, в случае грохочения пульпы наличие такой рассредоточенной ударной нагрузки приводит к разрушению водной пленки в ячейке сита, обусловленной поверхностным натяжением и вязкостью жидкости. Это содействует свободному прохождению тонких твердых частичек сквозь сито вместе с жидкостью и обеспечивает высокую эффективность классификации тонкодисперсных материалов и обезвоживания.

В лабораторных условиях были выполнены эксперименты по определению эффективности классификации и обезвоживания частиц кварца размером +0,4–7,0 мм. Влажность исходного продукта составляла 25–30 %.

На модели грохота с просеивающей поверхностью в виде металлической сетки с ячейкой 0,63 мм были установлены струны, собственная частота колебаний которых находилась в пределах 18–32 Гц, и частотный регулятор, который имеет пределы регулирования, соответствующие собственным частотам всего набора лент-струн.

Изучалось влияние частоты колебаний на просеивание материала и обезво-

живание надрешетного продукта. Эксперименты проводились при натяжении струн 25 % и амплитуде возмущений 2 мм. С помощью частотного регулятора частота возмущений изменялась от 16 до 30 Гц.

В результате экспериментов влажность надрешетного продукта уменьшалась до 11–14 %, при этом эффективность разделения класса +0,4–0,63 мм составляла 88–92 %.

При способе классификации и обезвоживания [38], ленты-струны, изготовленные из гидрофильного материала, периодически отводят от сита и наносят по нему удар, после чего верхнюю часть ленты-струны перемещают вдоль сита на расстояние, равное (или больше) шагу установки лент-струн, при этом расстояние от сита до верхней части ленты-струны меньше капиллярной постоянной; затем верхнюю часть ленты-струны перемещают вниз на расстояние, больше капиллярной постоянной. За счет нанесения ударов ситом лентами-струнами усиливаются его колебания и материала на сите, что приводит к более интенсивному разрыхлению перерабатываемого сырья и прохождению через него воды. Капли жидкости, висящие под ситом и удерживающиеся за счет сил поверхностного натяжения, удаляются следующим образом. Поскольку ленты-струны изготовлены из гидрофильного материала, то при движении верхней части ленты-струны вдоль сита на расстоянии от него до верхней части ленты-струны, меньшем капиллярной постоянной, она забирает на себя воду. При перемещении верхней части ленты-струны вниз на расстояние, большее капиллярной постоянной, происходит разрыв капиллярных мостиков и под действием сил инерции жидкость удаляется с ее поверхности. Сито очищается от капель жидкости, висящих под ним и удерживающихся за счет сил поверхностного натяжения, вследствие чего повышается эффективность разделения материала, очистки сита от частиц, застрявших в ячейках, и налипшего материала, что интенсифицирует процесс классификации и обезвоживания. Таким образом, интенсифицируется режим не всей массы короба, а только сита без дополнительного подведения мощности. Тем не менее, в случае классификации пульпы наличие такого воздействия приводит к разрушению водной пленки в ячейках сита, обусловленной поверхностным натяжением и вязкостью жидкости. Это содействует свободному прохождению тонких твердых частичек сквозь сито вместе с жидкостью и обеспечивает высокую эффективность классификации тонкодисперсных материалов и обезвоживания.

В лабораторных условиях на модели грохота под ситом в виде металлической сетки с ячейкой 0,05 мм были установлены ленты-струны из гидрофильного материала, собственная частота колебаний которых 20 Гц, и регуляторы амплитуды и частоты.

Были выполнены эксперименты по определению эффективности классификации и обезвоживания частиц кварца размером +0–0,4 мм. Влажность исходного продукта составляла 25–30 %. Изучалось влияние частоты и амплитуды колебаний на просеивание материала и обезвоживание надрешетного продукта.

Вначале эксперименты проводились при амплитуде возмущений 1 мм и их частоте 16 Гц. При этих параметрах ленты-струны колеблются, но работают в безударном и безотрывном от сита режиме. В результате экспериментов влаж-

ность надрешетного продукта снижалась до 18–20 %, при этом эффективность разделения класса +0–0,05 мм составляла 35–40 %.

Далее амплитуда возмущений была увеличена до 3 мм при их частоте 18 Гц. При этих условиях были реализованы режимы периодического отвода лент-струн от сита для нанесения по нему удара, перемещения верхней части лент-струн вдоль сита и вниз от него. В результате экспериментов влажность надрешетного продукта снижалась до 8–10 %, при этом эффективность разделения класса +0–0,05 мм составляла 75–80 %.

Для расширения спектра вибровозбуждения просеивающей поверхности в [33] предложено под ударником устанавливать дополнительный нелинейный упругий элемент с настраиваемым зазором. Это позволило увеличить эффективность обезвоживания. Однако дальнейшее повышение сдерживается необходимостью очистки просеивающей поверхности на этапе полета материала.

В работе [40] разработана математическая модель, описывающая движение просеивающей поверхности при виброударных режимах, однако отсутствуют сведения о достигаемых при этом технологических результатах.

Для интенсификации снижения влажности предложено использовать режимы с "двойными ударами" [41,42], когда за период возбуждения просеивающей поверхности наносится два удара. Вначале наносится первый удар, который способствует отрыву сырья от просеивающей поверхности и его разрыхлению. Затем на этапе полета наносится второй удар, который сообщает дополнительное ускорение просеивающей поверхности, что обеспечивает ее очистку от застрявших в отверстиях частиц и разрыв менисков жидкости. Важно отметить, что при нанесении второго удара грохотимое сырье не препятствует удалению частиц и жидкости.

Время сообщения импульса регулируют изменением зазора между просеивающей поверхностью и ударниками или собственной частоты ударников, но как частный случай может регулироваться их предварительным натяжением. Если у дополнительных ударников меньше предварительный натяг, чем у основных, они срабатывают раньше, если больше – позже.

Все эти настройки связаны с тем, что перерабатываемое сырье имеет различный гран-состав и физико-механические свойства, вследствие чего материалы реагируют в разное время на сообщаемые импульсы. В связи с этим регулировкой времени осуществляют подбор режимов нанесения дополнительных импульсов для различных материалов.

Таким образом, интенсифицируется режим не всей массы короба, а только просеивающей поверхности (на этапе полета сырья) без дополнительного подведения мощности. Тем не менее, в случае грохочения пульп наличие такой рассредоточенной ударной нагрузки приводит к разрушению водной пленки в ячейке просеивающей поверхности, обусловленной поверхностным натяжением и вязкостью жидкости. Это содействует свободному прохождению тонких твердых частичек сквозь просеивающую поверхность вместе с жидкостью и обеспечивает высокую эффективность классификации тонкодисперсных материалов и обезвоживания.

В практике обогащения трудоемким и имеющим высокие энергетические

расходы является процесс классификации и удаления влаги из продуктов, сформированных из тонких классов крупностью менее 0,2 мм. Частицы указанной крупности из-за их прилипания вследствие действия сил адгезии забивают ячейки просеивающей поверхности и нарушают эти процессы. К такому же результату приводит и наличие частиц неправильной формы.

В лабораторных условиях были выполнены исследования по определению эффективности грохочения и обезвоживания частиц кварца размером +0,05–2,0 мм. Влажность исходного продукта составляла 25–30 %.

На модели грохота с просеивающей поверхностью в виде металлической сетки с ячейкой 0,1 мм были установлены основной и дополнительный ударники, собственная частота колебаний которых находилась в пределах 20–35 Гц. Предварительное натяжение у дополнительного ударника было установлено так, чтобы он срабатывал после нанесения импульса основным ударником с задержкой 0,2 этапа полета грохотимого материала. Эксперименты проводились при амплитуде возмущений 2 мм и частоте 35 Гц. %. В результате экспериментов влажность надрешетного продукта уменьшалась до 8–10 %, при этом эффективность разделения класса +0,05–0,1 мм составляла 85–90 %.

Как известно из практики, наиболее сложным является процесс переработки материалов сформированных из широких классов крупности, которые традиционными методами вообще не классифицируются и не обезвоживаются.

Для решения этой задачи был разработан способ грохочения и обезвоживания трудноклассифицируемых материалов [43,44]. При разделении по классу меньшему, чем капиллярная постоянная, этому процессу препятствуют силы поверхностного натяжения, которые преодолеваются за счет динамического воздействия путем сообщения материалу и просеивающей поверхности нормальных и сдвиговых импульсов. Импульсы осуществляют дезинтегрирующими элементами (далее ДЭ) шарообразной или эллипсоидной формы, имеющими различные размеры. При создании возмущений ДЭ ударяют материал, выдавливая из него воду. За счет нанесения материалу и просеивающей поверхности в локальных областях нормальных импульсов усиливаются колебания просеивающей поверхности и материала на ней, интенсифицируя процесс классификации и обезвоживания. Так как возмущающая сила направлена под углом к просеивающей поверхности, ДЭ падают на нее также под углом, сообщая материалу сдвиговый импульс, что способствует более интенсивному его разрыхлению и разрушению капиллярных мостиков между частицами. ДЭ эллипсоидной формы при вибровозмущениях получают вращательные движения с одного бока на другой, увеличивая при ударе сдвиговые импульсы. Поскольку толщина слоя материала изменяется по длине рабочей поверхности, то на него необходимо воздействовать по-разному, поэтому импульсы также изменяют по длине просеивающей поверхности. Все это приводит к более интенсивному разрыхлению перерабатываемого сырья и прохождению через него воды, вследствие чего повышается эффективность разделения материала, очистки просеивающей поверхности от частиц, застрявших в отверстиях, и налипшего материала, что интенсифицирует процесс классификации и обезвоживания.

Таким образом, интенсифицируется режим колебаний не всей массы короба,

а только грохотимого материала и просеивающей поверхности без дополнительного подведения мощности. Тем не менее, в случае классификации пульпы наличие такого воздействия приводит к более интенсивному удалению жидкости из материала и разрушению водной пленки в ячейке просеивающей поверхности, обусловленной поверхностным натяжением и вязкостью жидкости. Это содействует свободному прохождению тонких твердых частичек сквозь просеивающую поверхность вместе с жидкостью и обеспечивает высокую эффективность классификации тонкодисперсных материалов и обезвоживания.

В лабораторных условиях на модели грохота, оснащенном регуляторами амплитуды и частоты, с просеивающей поверхностью в виде металлической сетки с ячейкой 0,1 мм, на которой находились ДЭ в виде шариков диаметром от 10 до 25 мм, были выполнены эксперименты по определению эффективности классификации и обезвоживания кварца размером +0–10 мм с высоким содержанием глинистых частиц. Влажность исходного продукта составляла 30 %. Изучалось влияние частоты и амплитуды колебаний на просеивание материала и обезвоживание надрешетного продукта.

Вначале эксперименты проводились при амплитуде возмущений 1 мм и частоте возмущений 20 Гц. При этих параметрах ДЭ колеблются, но работают в безударном режиме. В результате экспериментов влажность надрешетного продукта снизилась до 20–25 %, при этом эффективность разделения класса +0–0,1 мм составляла 35–40 %.

Далее амплитуда возмущений была увеличена до 4 мм при частоте возмущений 20 Гц. При этих условиях были реализованы режимы периодического отрыва ДЭ от просеивающей поверхности и нанесения по ней и перерабатываемому материалу ударов. В результате экспериментов влажность надрешетного продукта уменьшилась до 11–12 %, при этом эффективность разделения класса +0–0,1 мм повысилась до 60–70 %.

Исходя из изложенного можно сделать следующие выводы.

Для успешного применения грохотов с импульсным воздействием необходимо решить проблему синтеза для конкретного сырья оптимального спектра вибровоздействия, обеспечивающего максимальную эффективность классификации и обезвоживания при минимальных энергозатратах и максимальной долговечности. В условиях эксплуатации грохотов со значительными изменениями во времени грансостава и производительности по исходному продукту важно так же обеспечить самонастраивающийся режим возбуждения.

В настоящее время в ИГТМ НАН Украины ведутся работы направленные на создание вибрационного грохота, в котором будут реализованы следующие характеристики: расширение спектра воздействия на перерабатываемый материал, ресурса работы грохота, возможности оперативного управления, повышение стабильности работы, автоматического управления и при этом простота конструкции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайсберг Л. А. Просеивающие поверхности грохотов. Конструкция, материалы, опыт применения [Текст] / Л. А. Вайсберг, А. Н. Картавий, А. Н. Коровников. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2005. – 252 с.
2. Надутый В. П. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья [Текст] / В. П. Надутый, Е. С. Лапшин. – Киев: Наук. думка, 2005. – 180 с.
3. Лапшин Е.С. Экспериментальные исследования вибрационного воздействия на отделение жидкости при

- грохочении материала [Текст] / Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко, Л.Н. Прокопишин, А.В. Буров // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 3. – С. 71–74.
4. Руденко Р.К. Обезвоживание и пылеулавливание [Текст] / Р. К. Руденко, М. М. Шемаханов. – М.: Недра, –1984. –350 с.
5. Пат.20050011 US B01D 37/00.Установка вибрационного механического сита (варианты), используемый в ней четырехходовой пневмораспределитель и способ просеивания шлама (варианты) [Текст] / М. Д. Деррик, Р. Г. Деррик, Д. А. Муни, Н. К. Попеленский; Деррик копэруйшн. – №10/167,995; заявл. 12.06.02; опубл. 21.12.03, Бюл. ЕАПВ №2 – с. 22.
6. Пат. 379611 US, МПК<sup>7</sup> B07B 1/34. Vibratory sifting machine with strikers [Электронный ресурс] / R. Krause; фирма Rhewum. – № 118413; заявл. 24.02.71; опубл. 12.03.74. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents>. – Загл. с экрана.
7. Пат. 6220447 US, МПК<sup>7</sup> B07B 1/54. Variable frequency screening apparatus [Электронный ресурс] /G.F. Lambert, C.R. Maryville. – № 251789; заявл. 17.02.99; опубл. 24.04.01. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents>. – Загл. с экрана.
8. Пат. 5232099 US, МПК<sup>7</sup> B07B 1/28. Classifying apparatus and method [Электронный ресурс] / M.W. Maynard, N. Bedford; Production engineered products. – № 868991; заявл. 15.04.92; опубл. 3.08.93. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents>. – Загл. с экрана.
9. Равишин В.П. Исследование вибрационных грохотов с резонирующими просеивающими поверхностями для мелкого грохочения полезных ископаемых / Автореф. дисс. канд. техн. наук. - Днепропетровск. 1977. 25с.
10. Червоненко А.Г. Резонирующие ленточно - струнные сита для грохотов / А.Г. Червоненко, В.П. Надутый, Л.А. Вайсберг и др. - М: Строительные материалы. 1985, №2. -С 29-32.
11. Червоненко А.Г. Резонирующие ленточно - струнные сита / А.Г. Червоненко, В.П. Надутый, Л.А. Вайсберг и др. - М.: Строительные и дорожные машины. 1985, №12. - С. 11-12.
12. Потураев В.Н. Результаты промышленных испытаний и опыт эксплуатации резонирующих ленточно - струнных сит / В.Н. Потураев, А.Г. Червоненко, В.Л. Морус и др. Горный журнал. 1984, №2. - С. 49 - 52.
13. Червоненко А.Г. Научные основы создания горных вибрационных транспортно-технологических машин тяжёлого типа ; Автореф. дисс. докт. техн. наук. — Днепропетровск, 1985. - 43 с.
14. Вяльцева О.А. Грохочение рудных пульп в циклах измельчения на резонирующих ленточно-струнных ситах / О.А. Вяльцева, Л.А. Вайсберг, В.П. Надутый и др. - Л.: Обогащение руд. 1985. №3. - С. 2 - 4.
15. Морус В.Л. Обоснование параметров, разработка и внедрение резонирующих ленточно - струнных сит для тонкого грохочения руд : Автореф. дисс. канд. техн. наук. - Днепропетровск. 1983. - 20 с.
16. Надутый В.П. Грохот для сортировки щебня с высоким содержанием глины / В.П. Надутый, А.А. Гольдин // - М.: Совершенствование базы строительства. Серия 4, Вып. 7, 1982. -С. 9- 10. 72.
17. Надутый В.П. Использование резонирующих ленточно - струнных сит в конструкциях вибрационных грохотов / В.П. Надутый, А.А. Гольдин, Г.А. Погребижинский // Кокс и химия. 1991. №8. - С. 27 - 28.
18. Червоненко А.Г. Промышленные испытания грохотов ГИС-52 с резонирующими ленточно - струнными ситами, при грохочении материалов с высоким содержанием глины / А.Г. Червоненко, В.П. Надутый, А.А. Гольдин и др. - М.: Строительные и дорожные машины. 1982, №2, — С. 12 — 14.
19. Потураев В.Н., Франчук В.П., Надутый В.П. Вибрационная техника и технологии в энергоёмких производствах. – Монография / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, В.П. Надутый / Национальная горная академия Украины. – Днепропетровск. – 2002. – 186 с.
20. Потураев В.Н. Организация замкнутых циклов дробления на горно-обогатительных комбинатах, на базе нового вибрационного оборудования / Обогащение полезных ископаемых. 1971. Вып. 7. - С.68 - 72.
21. Надутый В.П. Полимерные просеивающие поверхности виброгрохотов / В.П. Надутый, В.Л. Золотарёва // Справочное издание: М.: Недра, 1993. - 140 с.
22. Грохочение липких материалов / Le criblage des produits Reber R. u bid miner et carriers. 1985. 67. Juill, 453 - 456.
23. Полулях А.Д. Математическое моделирование технологических процессов классификации углей на грохотах / Уголь Украины. - №12. - 1997. — С.47 -48.
24. Разделение сыпучих материалов и полидисперсных суспензий [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <http://www.kroosh.com>.
25. Пат. 6845868 US, МПК<sup>7</sup> B07B 1/42. Multifrequency vibratory separator system, a vibratory separator including same, and a method of vibratory separation of solid [Электронный ресурс] / I. Krush, Y. Obodan; Vibtec Engineering Ltd. – № 937593; заявл. 28.03.00; опубл. 25.01.05. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents>. – Загл. с экрана.
26. Виброгрохот Ultimate Screener™ (ULS™) [Электронный ресурс]/ – Режим доступа: [www.kbintel.com.ua](http://www.kbintel.com.ua). – Загл. с экрана.
27. Обогащение угля [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [http://www.vtcenter.ru/articles/coal\\_atic.htm](http://www.vtcenter.ru/articles/coal_atic.htm). – Загл. с экрана.
28. Обезвоживание на многочастотных вибрационных машинах [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [http://www.vtcenter.ru/articles/coal\\_atic.htm](http://www.vtcenter.ru/articles/coal_atic.htm). – Загл. с экрана.
29. Новые технологии инжиниринг [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [http://www.ntds.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=122&Itemid=207](http://www.ntds.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=122&Itemid=207). – Загл. с экрана.

30. Вопросы и ответы [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [http://www.kroosh.ru/?Voprosy\\_i\\_otvety%26nbsp](http://www.kroosh.ru/?Voprosy_i_otvety%26nbsp). – Загл. с экрана.
31. Борохович Д. Опыт применения технологии Kroosh для просеивания нерудных сыпучих материалов [Текст] / Д. Борохович, И. Круш, Ю. Ободан // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – 2007. – № (48) – С. 61–64.
32. Пат. 45544 Украина, МПК В07В 1/42. Привод поличастотного грохота / А.Ф. Булат, Г.А.Шевченко, В.Г. Шевченко - № u200906845; заявл. 30.06.09; опубл. 10.11.09, Бюл. №21. – 2 с.
33. Надутый В.П. Вибрационное грохочение горной массы повышенной влажности / В.П. Надутый, В.В. Калинин // Монография. – Днепропетровск, НГУ. - 2004.- 135 с.
34. Надутый В.П. Повышение эффективности удаления влаги при тонком грохочении горной массы за счет импульсного воздействия / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко, А.В. Буров // Науковий вісник: Наук.-техн. журнал / Національний гірничий університет України. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 2(122). – С. 95–99.
35. Лапшин Е.С. Определение удельной энергии, необходимой для обезвоживания минерального сырья при вибрационном грохочении / Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Науково-технічний збірник НГУ. "Збагачення корисних копалин". – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 50(91). – С. 179–186.
36. Лапшин Е.С. Энергоемкость процесса обезвоживания минерального сырья при вибрационном грохочении / Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Научно-технический и производственный журнал: "Металлургическая и горнорудная промышленность". – 2012. – №4 – С. 124-131.
37. Патент України на корисну модель №58794 від 26.04.2011. Спосіб класифікації та зневоднювання мінеральної сировини / В.П. Надутый, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко.
38. Патент України на корисну модель №65597 від 12.12.2011. Спосіб класифікації та зневоднювання / В.П. Надутый, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко.
39. Патент України на корисну модель №69225 від 24.04.2012. Грохот вібраційний / В.П. Надутый, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко.
40. Надутый В.П. Математическое моделирование виброударного движения сита грохота / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, И.П. Хмеленко // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2009. – № 1(53).– С. 36-39.
41. Надутый В.П. Математическое моделирование грохота с ударным возбуждением просеивающей поверхности / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Український міжвідомчий науково-технічний збірник: "Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні". – Видавництво Львівської політехніки. – Львів, 2011. – Випуск 45. – С. 320-324.
42. Патент України на корисну модель №65469 від 12.12.2011. Спосіб грохочення та зневоднювання мінеральної сировини, що важко класифікується / В.П. Надутый, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко.
43. Лапшин Е.С. Пути интенсификации обезвоживания минерального сырья на вибрационных грохотах / Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Науково-технічний збірник НГУ. "Збагачення корисних копалин". – Дніпропетровськ, 2011. - Вип. 47(88). – С. 144–151.
44. Патент України на корисну модель №67194 від 10.02.2012. Спосіб грохочення та зневоднювання матеріалів, що важко класифікуються / В.П. Надутый, Є.С. Лапшин, О.І. Шевченко.

Кандидаты техн. наук А.Т. Курносов,  
С.А. Курносов, И.Н. Слащев,  
инженер В.В. Задерий  
(ИГТМ НАН Украины)

инженер Г.И. Горбачев (шахта «Нестор»)

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПУЧЕНИЯ ПОЧВЫ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

Наведені результати експериментальних досліджень впливу гірничо-геологічних та гірничотехнічних факторів на інтенсивність здимання підшоши підготовчих виробок.

## **REGULARITIES FLOOR HEAVING IN DEVELOPMENT WORKINGS**

The brought results over of experimental researches of mining-and-geological and mining factors on intensity of hoist floor in development workings.

Одной из основных проблем поддержания подготовительных выработок на угольных шахтах Украины является борьба с пучением их почвы. Обострение данной проблемы в последнее время связано, в первую очередь, с постоянным увеличением глубины разработки. Высокое горное давление усугубляет влияние негативных геологических и технологических факторов. Низкая прочность вмещающих пород, их склонность к размоканию, высокое газовое давление, влияние способов проходки выработок и самого процесса угледобычи приводит к разрушению крепи и переходу выработок в непригодное для дальнейшей эксплуатации состояние. Причем, при определенном сочетании влияющих факторов, доля пучения почвы в общей вертикальной конвергенции достигает 80 %. К настоящему времени разработано множество способов и средств борьбы с пучением, однако эффективное их применение возможно только при индивидуальном подходе для определенных типов условий [1, 2]. В связи с этим, разработка данных шахтных экспериментальных исследований степени влияния отдельных факторов на состояние почвы подготовительных выработок позволит более эффективно применять комплексы мероприятий по повышению их устойчивости.

Замеры смещений пород боков и почвы осуществляли на различных участках горных выработок, находящихся как в зоне, так и вне зоны влияния очистных работ. Закономерности проявления горного давления, распределение напряжений и трещиноватости в почве и боках подготовительных выработок изучали на шахтах производственного объединения «Укрзападуголь», отличающихся физико-механическими свойствами вмещающих пород, глубиной разработки, способами проходки и охраны выработок, степенью обводненности, особенностями ведения очистных работ и др.

Исследования проводили в соответствии с разработанной программой и методикой экспериментальных исследований устойчивости боков и почвы горных выработок [3] без мероприятий по поддержанию почвы и боков выработки в зоне и вне зоны влияния очистных работ. Для установления общих закономерностей пучения почвы, исследования проводили по группе шахт ПО «Укрзападуголь» с различными способами проведения подготовительных выработок и