

[www.rudmet.ru](http://www.rudmet.ru)

ISSN 0372-2929

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1926 г.  
(№ 942)

**6. 2021**



## *Уважаемые читатели и коллеги!*

Значимость металлургии в современном мире сложно переоценить. Ее плодами пользуются практически все отрасли промышленности — от сельского хозяйства до аэрокосмических разработок.

Представленный вашему вниманию июньский номер ярко демонстрирует мультидисциплинарность современной металлургической отрасли. Она включает в себя научные и технологические разработки горнодобывающей (добыча и обогащение металлических руд), металлургической (способы получения металлов, сплавов и изделий на их основе), химической (разработка и исследование модифицирующих покрытий на металле) и даже информационных технологий (методы оптимизации исследований и производства).

Так, в статье «Выделение меди из отходов гальванических производств», опубликованной в разделе «Тяжелые цветные металлы», авторы приводят результаты, полученные при изучении регенерации медно-аммиачных травильных растворов с получением плотных осадков меди. Сообщается о возможности использования выделенной меди для металлизации подложек или для электротехнических целей.

В выпуске опубликованы статьи об оборудовании для тонкого гидравлического грохочения измельченных руд, для закрытого перелива расплава из вакуум-транспортного ковша.

Заслуживает особого внимания подборка статей по применению наноматериалов для пленок и покрытий.

Подобное многообразие тем номера требует от специалиста обладания комплексом знаний в целом ряде наук — от материаловедения до экологии. Исследованиями во всех этих отраслях занимается Южно-Российский государственный политехнический университет ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова. Образованный 18 октября 1907 г. в Новочеркасске как Донской политехнический институт, за свою историю университет подготовил более 150 тысяч специалистов, высококвалифицированных инженеров, ученых, производственников. В их числе такие выдающиеся ученые, как директор Центрального научно-исследовательского института черной металлургии имени И. П. Бардина И. Н. Голиков, директор Донецкого металлургического завода И. М. Ектов, генеральный директор ГУСИМЗ цветной металлургии «Висмут» М. М. Мальцев, один из основателей отечественного вертолетостроения М. Л. Миль, генеральный конструктор ОКБ имени П. О. Сухого М. П. Симонов, руководитель Объединения предприятий по добыче вольфрама, олова, урана, золота и алмазов Л. Л. Солдатов и многие другие.

Научные исследования ученых университета публикуют в ведущих российских и международных журналах, в том числе и в журналах Издательского дома «Руда и Металлы». В этом номере журнала вниманию читателей представлена статья университета о синтезе пористых силикатных материалов при использовании фторида натрия в качестве флюсующей добавки.

В заключение хочется пожелать, чтобы исследования, приведенные в данном номере, поспособствовали дальнейшему расширению и углублению научных знаний. Приятного чтения!

*Е. А. Яценко,  
заведующая кафедрой «Общая химия и технология силикатов»  
Южно-Российского государственного политехнического университета  
(НПИ) имени М. И. Платова, докт. техн. наук, проф., эксперт РАН*

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Подписной индекс:  
83869 (ОК «Пресса России»)

6(942) • 2021

ИЮНЬ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Журнал основан в 1926 г.

Официальный информационный орган Федерального УМО «Технологии материалов»

## УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «Издательский дом «Руда и Металлы», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

**Журнал выпускается при участии:** ПАО «ГМК «Норильский никель», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ФГБУК «Государственный Эрмитаж»;

**при содействии:** ГП «Новоийский горно-металлургический комбинат», Научно-технического союза по горному делу, геологии и металлургии (Республика Болгария)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Временно исполняющий обязанности главного редактора **А. Г. Воробьёв**  
Первый зам. главного редактора **В. Н. Бричкин**

**З. С. Абишева**, **Р. Х. Акчурин**, **М. В. Астахов** (редактор раздела «Наноструктурированные металлы и материалы»), **В. Ю. Бажин**, **Н. А. Белов** (редактор разделов «Металлообработка», «Материаловедение»), **В. А. Бочаров** (редактор раздела «Обогащение»), **Г. Ю. Боярко**, **Г. М. Вольдман** (редактор раздела «Редкие металлы, полупроводники»), **В. В. Геневски**, **Л. А. Глазунов**, **В. Б. Деев**, **М. И. Дли**, **В. А. Дмитриев**, **А. М. Дриц**, **А. В. Зиновьев**, **В. А. Игнаткина**, **М. Г. Исаенкова**, **В. С. Кальченко**, **С. С. Киров**, **Б. Г. Киселёв**, **П. А. Козлов**, **С. И. Корнеев** (редактор раздела «Экономика и управление производством»), **Б. А. Котляр**, **Ю. А. Котляр**, **В. А. Крюковский** (редактор раздела «Легкие металлы, углеродные материалы»), **А. Б. Лебедь**, **Е. А. Левашов** (редактор раздела «Композиционные материалы и многофункциональные покрытия»), **Ю. В. Левинский**, **Г. С. Макаров**, **Н. Е. Мальцев** (редактор раздела «Автоматизация»), **М. А. Меретуков**, **А. М. Мицик**, **В. И. Москвитин**, **С. С. Набойченко**, **А. И. Николаев**, **А. М. Птицын**, **В. К. Румянцев**, **А. Г. Рыжов**, **Ф. М. Сафин**, **А. Н. Селезнёв**, **А. В. Сулицин**, **А. В. Тарасов**, **Л. Ш. Цемехман**, **Л. Б. Цымбулов** (редактор раздела «Тяжелые цветные металлы»), **И. И. Чернов**, **М. Р. Шапировский**, **В. И. Щёголев**.  
Зарубежные члены редколлегии: **Ж. Баатархуу** (Монголия), **В. В. Геневски** (Болгария), **Д. Дрейсингер** (Канада), **Е. Жак** (Австралия), **К. Кнуутила** (Финляндия), **Б. Фридрих** (Германия).

## РЕДАКЦИЯ:

временно исполняющий обязанности главного редактора **А. Г. Воробьёв**; выпускающий редактор **Н. В. Шаркина**;  
редактор **Г. Е. Форысенкова**; мл. редактор **А. И. Карташева**;  
ответственная за предпечатную подготовку издания **О. Ю. Жукова**.

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»  
Адрес издателя: 119049, Москва, а/я № 71

Адрес редакции: Москва, Ленинский просп., д. 6,  
стр. 2, НИТУ «МИСиС», комн. 624  
Почтовый адрес: 119049, Москва, а/я № 71  
Тел./факс: (495) 955-01-75; моб.: 8-926-504-89-75  
Эл. почта: tsvetmet@rudmet.ru; интернет: www.rudmet.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

(Свидетельство ПИ № ФС77-69818 от 29.05.2017 г.).  
Товарный знак и название «Цветные металлы» являются исключительной собственностью Издательского дома «Руда и Металлы».

Материалы, отмеченные «Реклама», публикуются на правах рекламы.

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель.

Все публикуемые материалы научно-технического характера проходят обязательную стадию рецензирования.

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор.

За сроки размещения опубликованных статей в базе данных Scopus редакция ответственности не несет.

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведение материалов, публикуемых в журнале, возможна только с письменного разрешения редакции.

При перепечатке ссылка на журнал «Цветные металлы» обязательна.

Отпечатано в типографии «Канцлер»  
Адрес типографии: 150044, Россия, Ярославль,  
ул. Полушкина Роща, д. 16, стр. 66А,  
тел.: 8(4852)58-76-33

Подписано в печать с оригинал-макета 30.06.2021.  
Формат 60x90 1/8. Печ. л. 11,75. Бумага офсетная.  
Печать офсетная.  
Тираж 1000 экз. Цена свободная.  
Дата выхода в свет 14.07.2021.

ISSN 0372-2929



9 770372 292006 >

# Содержание

---

## Экономика и управление производством

**Международный обзор рынка цветных металлов** ..... 4

## Обогащение

**Косой Г. М., Винников А. Я.** Технологические испытания процесса тонкого гидравлического грохочения  
измельченных руд на многочастотном грохоте компании Kroosh Technologies ..... 10

## Тяжелые цветные металлы

**Нестер А. А., Никитин А. А., Гусев А. Н., Придолоба А. В.** Выделение меди из отходов гальванических  
производств ..... 16

## Благородные металлы и их сплавы

**Белоусов О. В., Белоусова Н. В., Борисов Р. В., Рюмин А. И.** Извлечение примесных элементов  
из концентратов металлов платиновой группы в гидротермальных условиях ..... 23

**Волчкова Е. В., Филинова А. С.** Сорбция катионных комплексов палладия (II) из тиомочевинных растворов. . . 31

## Легкие металлы, углеродные материалы

**Баранов В. Н., Куликов Б. П., Партыко Е. Г., Юрьев П. О.** Технология и оборудование для закрытого  
перелива расплава из вакуум-транспортного ковша с использованием сифона. .... 39

## Композиционные материалы и многофункциональные покрытия

**Гольцман Б. М., Яценко Е. А., Яценко Л. А., Ирха В. А.** Синтез пористых силикатных материалов  
при использовании фторида натрия в качестве флюсующей добавки. .... 44

## Наноструктурированные металлы и материалы

**Прокопчук Н. Р., Глоба А. И., Лаптик И. О., Сырков А. Г.** Улучшение свойств покрытий по металлу  
наноалмазными частицами. .... 50

**Тупик В. А., Потапов А. А., Марголин В. И., Кострин Д. К.** Применение дугового разряда  
для нанесения металлических наноразмерных пленок ..... 55

## Материаловедение

**Румянцева С. Б., Румянцев Б. А., Симонов В. Н.** Влияние снижения уровня кислорода  
в хромоникелевом сплаве, дополнительно легированном тугоплавкими металлами,  
на механические свойства и микроструктуру ..... 60

## Металлообработка

**Щицын Ю. Д., Кривоносова Е. А., Ольшанская Т. В., Никулин Р. М.** Использование плазменной  
наплавки для аддитивного формирования заготовок из магниевых сплавов ..... 68

**Певзнер М. З.** Об управлении фрезерованием цветного проката. .... 74

**Толстобров А. К., Шаталов Р. Л., Буднева Т. В., Агафонов А. А.** Исследование влияния температуры отжига  
на механические свойства тонких лент из сплава МНЦ12-24 при обработке на непрерывном агрегате ..... 80

**Ямников А. С., Чуприков А. О.** Моделирование деформаций алюминиевых оболочек при растачивании. . . . 85

## Наши юбиляры

Николаю Павловичу Абрамову — 75 лет ..... 8

## Хроника

**АБИШЕВА Зинеш Садыровна** ..... 91

**МЕДВЕДЕВ Александр Сергеевич** ..... 22

Памяти Леонида Анисимовича Глазунова. .... 92

\*\*\*

Требования к оформлению статей. .... 94

---

**Журнал включен в Международные базы данных Scopus (2-й квартиль, 2019, по версии SCIMAGO),  
а также Chemical Abstracts Service**

---

*Журнал по решению ВАК Минобрнауки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по разработке месторождений твердых полезных ископаемых, по металлургии, по экономике, по химии.*

---

*Статьи всех авторов, в том числе аспирантов, публикуются в порядке общей очереди бесплатно (за исключением статей рекламного характера).*

---

## Технологические испытания процесса тонкого гидравлического грохочения измельченных руд на многочастотном грохоте компании Kroosh Technologies

УДК 622.74

**Г. М. Косой**, главный обогатитель, докт. техн. наук, эл. почта: grigory.k@kroosh.com

**А. Я. Винников**, руководитель проекта, канд. техн. наук

Kroosh Technologies Ltd., г. Ашдод, Израиль.

Приведены характеристики, принцип действия и отличия высокочастотных грохотов, разработанных компаниями Derrick и Landsky и многочастотных грохотов, разработанных компанией Kroosh Technologies. Принципиальное отличие параметров вибрации рабочих сеток при высокочастотном и многочастотном режимах заключается в разнице импульсов, создаваемых системой вибрационного возбуждения. В высокочастотных грохотах максимальное ускорение рабочих сит не превышает 10g. В многочастотных грохотах измеренные положительные и отрицательные ускорения корпуса грохота равны 3g, однако при взаимодействии с разработанной системой многочастотной вибрации положительные пиковые ускорения рабочей сетки достигают (50÷60)g, а отрицательные ускорения — (150÷200)g. В этом режиме обеспечивается непрерывная очистка рабочих сеток от просеиваемого материала, увеличивается удельная производительность и эффективность грохочения. На экспериментальной установке проведены несколько десятков технологических испытаний разных руд. Приведена небольшая выборка качественно-количественных результатов гидравлического грохочения тонкоизмельченных руд на сетках с поперечной щелью 75 и 100 мкм, полученных на экспериментальной установке с многочастотным грохотом размером 1500×600 мм. При гидравлическом грохочении измельченной хромовой руды на сетке с размером отверстий 0,1×2,6 мм, при удельной нагрузке по исходной руде 2,65 т/(ч·м<sup>2</sup>) извлечение в подрешетный продукт было получено 91,8 % класса –100 мкм. На сетке 0,075×2,6 мм, при удельной нагрузке по исходной руде 1,66 т/(ч·м<sup>2</sup>), извлечение класса –75 мкм в подрешетный продукт составило 88,78 %. При гидравлическом грохочении измельченной оловянной руды на сетке 0,1×2,6 мм, при удельной нагрузке по исходной руде 2,94 т/(ч·м<sup>2</sup>), извлечение класса –100 мкм в подрешетный продукт получено 93,93 %. Многочастотные грохоты успешно работают на обогатительных фабриках «Казцинк» и Glencore (South Africa).

**Ключевые слова:** высокочастотный грохот, многочастотный грохот, полиуретановое сито, ускорение рабочих сит, очистка, гидравлическое грохочение, экспериментальная установка, удельная нагрузка, извлечение, подрешетный продукт.

**DOI:** 10.17580/tsm.2021.06.01

В последнее десятилетие продолжались экспериментальные работы и промышленное освоение процесса и оборудования тонкого гидравлического грохочения на высокочастотных грохотах в схемах обогащения руд черных, цветных и редких металлов, а также апатито-нефелиновых руд. Цель этих работ — дальнейшая оптимизация технологических режимов и гранулометрического состава измельченных руд перед флотацией и другими процессами путем замены гидроциклонов в замкнутых циклах измельчения на высокочастотные грохоты тонкой гидравлической классификации.

Основным разработчиком таких аппаратов в течение многих лет являлась корпорация Derrick (США), которая первая разработала и внедрила высокочастотные грохоты Stack Sizer на обогатительных фабриках Северной и Южной Америки, а также в других странах. Принципиальной новизной технического решения при освоении процесса тонкого грохочения полидисперсной пульпы явилась разработка полиуретановых сеток с минимальным размером отверстий до 45–75 мкм и живым сечением 35–40 % [1, 2].

В последнее десятилетие китайская фирма Landsky Tech. Co. также начала разрабатывать и внедрять высокочастотные грохоты, оборудованные полиуретановыми рабочими сетками собственного производства. Эти аппараты по принципу действия и конструкции практически не отличаются от Stack Sizer корпорации Derrick. При выборе оборудования для обогатительной фабрики ОАО «Апатит» [3] грохоты Landsky составили конкуренцию Derrick.

Аппарат Stack Sizer (Derrick) представляет собой пятидечную конструкцию, смонтированную на общей внешней неподвижной раме. Внутри нее на резиновых амортизаторах подвешены пять корпусов грохотов с полиуретановыми ситами. Одноименные продукты грохочения объединяются и разгружаются через два желоба. Для создания вибрации рабочих сеток внутренний корпус соединен с двумя электродвигателями, вращающимися в противоположные стороны. Частота вибрации корпуса грохотов равна 25 Гц, амплитуда — 1 мм, максимальное ускорение рабочей сетки — (8÷10)g, гранулометрический состав руды — (5–0,045) мм.

Главным отличием конструкции вибрационных грохотов, разработанных компанией Kroosh Technologies Ltd., является многочастотная нелинейная вибрационная система рабочих сеток, в которой реализован режим «странного аттрактора» [4] — рабочая сетка колеблется в многочастотном режиме, а динамическое усиление обеспечивает увеличение ее амплитуды в 3–8 раз. Например, на многочастотном грохоте размером 1500×600 мм, установленном на экспериментальной установке, измеренные положительные и отрицательные ускорения корпуса составили 3g, однако при взаимодействии корпуса с разработанной системой многочастотной вибрации положительные пиковые ускорения рабочей сетки увеличиваются до (50±60)g, а отрицательные ускорения — до (150±200)g (рис. 1).

Эффект «странного аттрактора» стабилизирует вибрационную систему в резонансной области в широком диапазоне частот. В этом режиме обеспечивается непрерывная очистка рабочей сетки от просеиваемого материала, увеличивается удельная производительность и эффективность грохочения. Следует особо подчеркнуть эффективную очистку тонких рабочих сеток на многочастотных грохотах Kroosh Technologies при просеивании полидисперсной пульпы. Перечисленные элементы конструкции и режим вибрации рабочих сеток обеспечивают принципиальное отличие многочастотных грохотов от высокочастотных. Для этого внутри корпуса грохота закреплены «механические адаптеры», которые при помощи внутренней

упругой связи соединены с подвижной бильной решеткой, взаимодействующей с рабочей сеткой, возбуждая на ней многочастотную вибрацию. Сменная рабочая сетка, расположенная над бильной решеткой, натянута вдоль корпуса и прикреплена к нему.

Для исследования оптимальных динамических режимов и качественно-количественных показателей мокрого грохочения различных типов измельченных руд проведена серия экспериментов. Установка с многочастотным грохотом размером 1500×600 мм включала: чан-мешалку для приготовления пульпы, песковый центробежный насос, систему трубопроводов для подачи пульпы на грохот и возврата продуктов грохочения в чан-мешалку, приборы измерения расхода и давления пульпы в трубопроводах. Для повторного перемешивания пульпы (после остановки пескового насоса и привода мешалки) корпус мешалки снабжен системой подачи сжатого воздуха в патрубок разгрузки и трубопровод подачи пульпы в песковый насос. Схема цепи аппаратов экспериментальной установки, общий вид и краткие технические характеристики основного оборудования приведены на рис. 2.

Пробы пульпы, отобранные при работе экспериментальной установки, подвергали ситовому анализу на полуавтоматическом многочастотном ситовом анализаторе MSA-W/D-200 (Kroosh Technologies) [5], пульт управления которого позволяет изменять число стадий гидравлического грохочения, частоту вибрации сит и время просеивания. Расход воды на орошение сит устанавливают вручную и контролируют на стеклянном ротаметре.

Численные результаты измерений и ситовых анализов записывали в запрограммированную таблицу Excel, в которой после записи результатов опробования (ситовых анализов питания, подрешетного и надрешетного продуктов, а также расхода потоков и содержания в них твердой фазы) автоматически вычислялись все количественные показатели мокрого грохочения исследуемой пробы руды (табл. 1–3). В этих таблицах рассчитаны абсолютно все качественно-количественные показатели исследуемого процесса для руд разного вещественного и гранулометрического состава, включая фракционное извлечение в подрешетный продукт. Это позволяет построить соответствующий график и определить границу разделения.

В представленных таблицах приведены результаты исследований проб измельченных руд с промышленных предприятий, на которых были внедрены многочастотные грохоты. Грохочение проводили с использованием полиуретановых сит

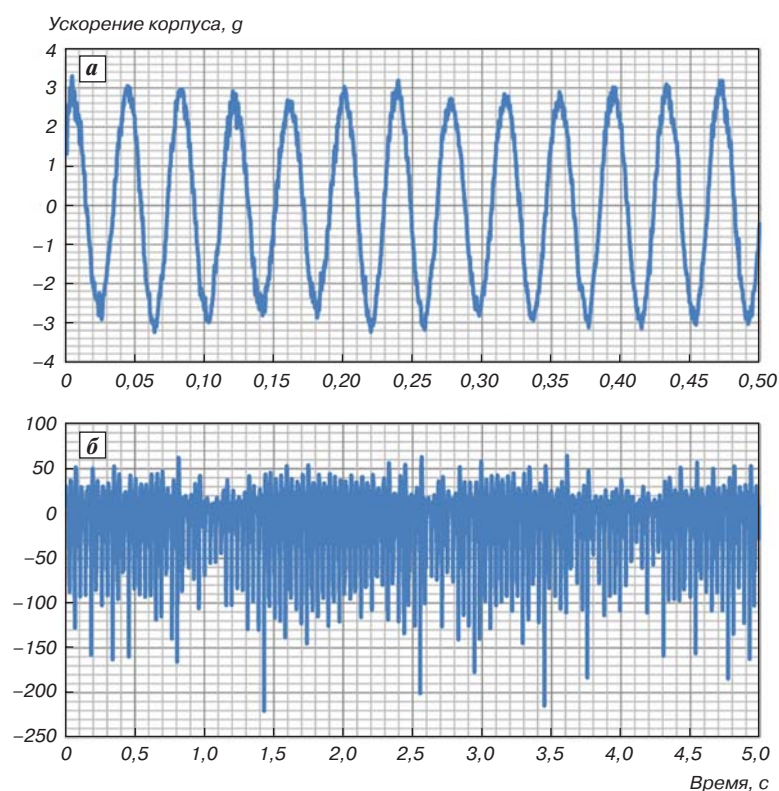
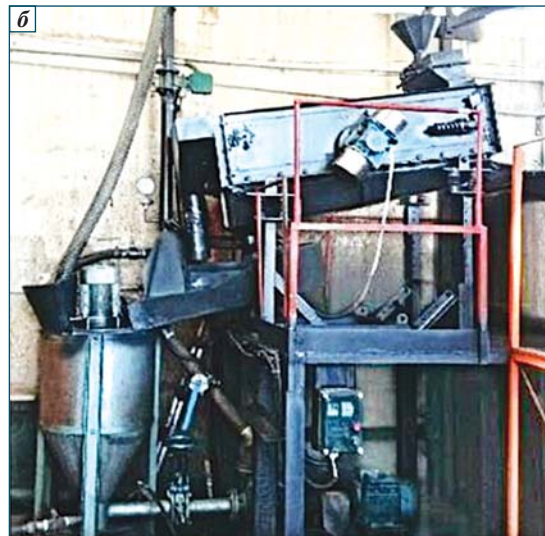
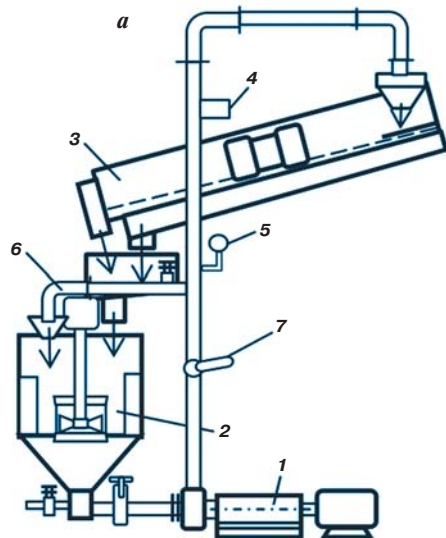


Рис. 1. Осциллограмма ускорений корпуса многочастотного грохота (а) и ускорений его рабочей сетки (б) при номинальной частоте колебаний 25 Гц



**Рис. 2.** Схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки гидравлического грохочения измельченных руд в замкнутом цикле: 1 — центробежный насос производительностью 25 м<sup>3</sup>/ч; 2 — смеситель пульпы объемом 0,2 м<sup>3</sup>; 3 — многочастотный грохот 1500×600 мм, наклон корпуса — 15°, два электродвигателя N = 0,52 кВт, RPM 1500; 4 — расходомер; 5 — манометр; 6 — устройство для отбора проб питания грохота; 7 — задвижка с поворотной заслонкой

с размерами щели от 0,063 до 0,4 мм. В связи с ограниченным объемом в статье приведены результаты гидравлического грохочения тонкоизмельченных руд только на сетках со щелью 0,075 и 0,1 мм, используемых в основном при обогащении тонковкрапленных руд цветных, редких и черных металлов.

В табл. 1 приведены характеристика и режим работы грохота гидравлической классификации пробы тонкоизмельченной хромовой руды, присланной одной из обогатительных фабрик компании Glencore (South Africa). Удельная нагрузка на грохот по исходной руде составила 2,65 т/(ч·м<sup>2</sup>), а извлечение класса –100 мкм в подрешетный продукт — 91,8 %.

В табл. 2 представлены показатели аналогичного процесса для хромовой руды близкого гранулометрического состава, но на сетке с меньшим размером ячейки. В этом опыте достигнута удельная нагрузка на грохот 1,66 т/(ч·м<sup>2</sup>) по исходной руде, а извлечение класса –75 мкм в подрешетный продукт составило 88,78 %.

В табл. 3 приведены характеристика и режим работы грохота для мокрого грохочения пробы

Таблица 1  
**Результаты мокрого грохочения измельченной хромовой руды. Полиуретановая сетка, размер ячейки 0,1×2,6 мм, живое сечение — 27,2%**

Полезная площадь, м <sup>2</sup>	0,7	Измеренные и расчетные технологические показатели, %		
Удельный вес руды, г/см <sup>3</sup>	3,9			
Крупность фракций, мкм	Фракционное извлечение в подрешетный продукт	питание грохота*	подрешетный продукт*	надрешетный продукт*
+300	0,00	0,51		2,41
–300+250	0,00	0,65		3,23
–250+200	0,00	1,61		7,78
–200+150	4,65	4,43	0,26	19,75
–150+100	36,56	11,02	5,08	34,41
–100+75	91,26	14,99	17,25	14,25
–75+53	84,36	16,79	17,86	7,98
–53+38	94,36	16,70	19,87	3,58
–38	94,50	33,3	39,68	6,61
Итого фракций		100	100	100
Сумма фракций –100 мкм, %		81,78	94,66	32,42
Содержание твердого в пульпе*, %		33,58	30,26	69,52
Ж:Т в пульпе		2,00	2,30	0,44
Подача и разгрузка*, м <sup>3</sup> /ч		4,34	4,10	0,24
Нагрузка по твердой фазе, т/ч		1,85	1,55	0,31
Удельная нагрузка по твердому, т/(ч·м <sup>2</sup> )		2,65	2,21	0,44
Удельная нагрузка по пульпе, м <sup>3</sup> /(ч·м <sup>2</sup> )		6,20	5,86	0,34
Выход твердой фазы по балансу фракций –100 мкм, %		100	79,31	20,69
Извлечение фракций –100 мкм, %		100	91,80	8,20

\*Исходная информация.

Таблица 2

**Результаты мокрого грохочения измельченной хромовой руды. Полиуретановая сетка, размер ячейки 0,075×2,6 мм, живое сечение 24,7 %**

Полезная площадь, м <sup>2</sup>	0,7	Измеренные и расчетные технологические показатели, %		
Удельный вес руды, г/см <sup>3</sup>	3,9			
Крупность фракций, мкм	Фракционное извлечение в подрешетный продукт	Питание грохота*	Подрешетный продукт*	Надрешетный продукт*
+300	0,00	0,56		1,97
–300+250	0,00	0,84		2,62
–250+200	0,00	2,01		6,12
–200+150	1,78	5,81	0,16	16,68
–150+100	9,54	12,74	1,88	33,73
–100+75	49,53	15,25	11,69	18,97
–75+53	81,71	6,92	8,75	5,42
–53+38	89,29	23,91	33,04	10,06
–38	89,93	31,96	44,48	4,43
Итого фракций		100	100	100
Сумма фракций –75 мкм, %		62,79	86,27	19,91
Содержание твердого в пульпе*, %		32,04	24,38	76,44
Ж:Т в пульпе		2,12	3,10	0,31
Подача и разгрузка*, м <sup>3</sup> /ч		2,76	2,53	0,23
Нагрузка по твердой фазе, т/ч		1,16	0,75	0,41
Удельная нагрузка по твердому, т/(ч·м <sup>2</sup> )		1,66	1,08	0,58
Удельная нагрузка по пульпе, м <sup>3</sup> /(ч·м <sup>2</sup> )		3,94	3,61	0,33
Выход твердой фазы по балансу фракций –75 мкм, %		100,00	64,62	35,38
Извлечение фракций –75 мкм, %		100,00	88,78	11,22

\*Исходная информация.

тонкоизмельченной оловянной руды на полиуретановой сетке с ячейкой 0,1×2,6 мм для компании Lico podium Minerals Africa\*. В этом опыте удельная нагрузка на грохот по исходной руде достигнута 2,94 т/(ч·м<sup>2</sup>), а извлечение класса –100 мкм в подрешетный продукт — 93,93 %.

В институте «Уралмеханобр» выполнен большой объем технологических исследований и испытаний, включающих подготовку измельченной медно-цинковой руды на многочастотном грохоте ULS 1506.11 компании Kroosh Technologies [6]. Ниже перечислены результаты некоторых из них.

Применение многочастотного грохота вместо гидроциклона в замкнутом цикле измельчения медно-цинковой руды позволило снизить циркулирующую нагрузку на 15 %, повысить крупность раскрытых зерен рудных минералов на 15–20 %, повысить качество обогащаемого продукта за счет увеличения массовой доли раскрытых минералов флотационной крупности.

\*В пилотных испытаниях принимали участие инженеры И. Винникова и С. Богданник.

Изменение качества и состава конечного продукта позволило повысить общее извлечение полезных минералов в концентраты флотационного обогащения [7–10].

Процесс тонкого грохочения перспективен также для железорудных обогатительных фабрик в целях увеличения содержания железа в конечном концентрате и перехода на прямое восстановление железа. Это потребует полной реконфигурации схем стадийного измельчения с заменой гидроциклонов в каждой стадии на многочастотные грохоты. При такой схеме эти аппараты более предпочтительны по сравнению с высокочастотными, так как при многотоннажном непрерывном производстве увеличивается вероятность зарастания открытой поверхности сит «трудными зёрнами» руды, вследствие чего уменьшится эффективность грохочения [11, 12].

Горно-металлургическая компания «Казцинк» первой в СНГ начала промышленное внедрение и эксплуатацию многочастотных грохотов. В настоящее время одно-модульные и двухмодульные аппараты гидравлического грохочения, оборудованные полиуретановыми сетками с прямоугольными отверстиями 0,063×2,5 мм работают в циклах



**Рис. 3.** Высокочастотный пятидечный грохот Stack Sizer, Derrick Corporation



Таблица 3

**Результаты мокрого грохочения измельченной оловянной руды. Полиуретановая сетка, размер ячейки 0,1×2,6 мм, живое сечение 27,2 %**

Полезная площадь, м <sup>2</sup>	0,7	Измеренные и расчетные технологические показатели, %		
Удельный вес руды, г/см <sup>3</sup>	2,7	Питание грохота*	Подрешетный продукт*	Надрешетный продукт*
Крупность фракций, мкм	Фракционное извлечение в подрешетный продукт			
+500	0,00	3,35		3,74
-500+400	0,00	5,31		8,92
-400+300	0,00	14,53		23,63
-300+200	0,00	20,03		34,09
-200+150	6,96	9,41	1,60	15,57
-150+125	31,96	3,92	3,06	6,28
-125+100	57,97	4,93	6,98	3,81
-100+75	84,15	5,81	11,94	1,42
-75	95,67	32,71	76,42	2,54
Итого фракций		100	100	100
Сумма фракций - 100 мкм, %		38,52	88,36	3,96
Содержание твердого в пульпе*, %		33,58	15,55	75,79
Ж:Т в пульпе		2,40	5,43	0,32
Подача и разгрузка*, м <sup>3</sup> /ч		5,74	4,90	0,84
Нагрузка по твердой фазе, т/ч		2,06	0,84	1,22
Удельная нагрузка по твердому, т/(ч·м <sup>2</sup> )		2,94	1,20	1,74
Удельная нагрузка по пульпе, м <sup>3</sup> /(ч·м <sup>2</sup> )		8,20	7,00	1,20
Выход твердой фазы по балансу фракций - 100 мкм, %		100	40,95	59,05
Извлечение фракций - 100 мкм, %		100,00	93,93	6,07

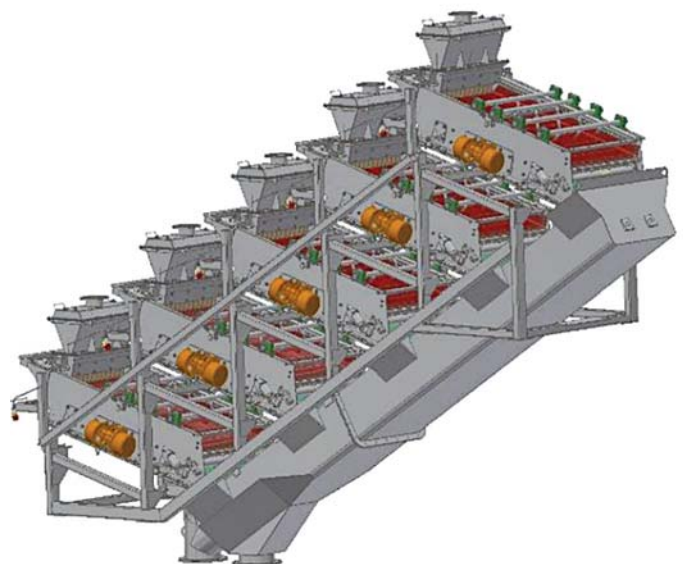
\*Исходная информация.

ультратонкого измельчения золотосодержащей и сульфидной руды, а также при отделении пульпы сульфата цинка от гипса. Продолжается внедрение многочастотных грохотов и в других операциях технологической схемы.

На рис. 3–5 приведены общие виды пятидечных вибрационных грохотов корпорации Derrick, компаний Landsky и Kroosh Technologies. Представленные аппараты отличаются не только принципом возбуждения рабочих сеток, но и компоновкой корпусов просеивающих модулей. В грохотах корпорации Derrick и компании Landsky возбуждение рабочих сит осуществляется одновременно двумя электродвигателями, соединенными с внутренней подвижной рамой. В многодечном грохоте Kroosh Technologies каждый корпус просеивающего модуля снабжен двумя автономными электродвигателями с внутренними дебалансами, установленными на бортах корпуса. Система многочастотной вибрации смонтирована внутри каждого корпуса грохота и взаимодействует с рабочей сеткой, натянутой вдоль корпуса и закрепленной к нему.




**Рис. 4.** Высокочастотный пятидечный грохот Stack Sizer, Landsky Tech Co. Китай



**Рис. 5.** Многочастотный пятидечный грохот Kroosh Technologies Ltd, Израиль

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Albuquerque L., Wheeler J., Valine S., Ganahl B., Barrios G.** Application of high frequency screens in closing grinding circuits // XXIII Encontro Nacional de Minerals e Metalurgia Extractiva. 2009. P. 167–173.
2. **De Lado M., Diaz G., Chambi R.** Expansion de produccion de condestable com innovaciones tecnologicas de classification de molienda // XXVIII Convencion Minera Extemin. — Peru, 2007. P. 3–33.
3. **Chernova E. V., Chernov D. V.** Current status and application of fine screening technology in China // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022005.
4. **Круш И. И., Борохович Д. Е., Косой Г. М.** Применение технологии Kroosh для процессов разделения сыпучих материалов и полидисперсных суспензий // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. № 14. 2009. С. 171–183.
5. **Kosoy G., Kroosh Y., Slavutin M.** Development of multifrequency sieve analyzer. — URL: <https://grigorykosoy.academia.edu/research#papers> (дата обращения: 20.05.2021).
6. **Газалеева Г. И., Мамонов С. В.** Современное техническое состояние и технологические возможности тонкого грохочения в обогащении руд цветных металлов // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 1. С. 139–146.
7. **Цыпин Е. Ф., Мамонов С. В., Власов И. А.** Продукты классификации и тонкого грохочения замкнутого цикла измельчения медно-цинковой руды // Известия вузов. Цветная металлургия. 2016. № 2. С. 4–11.
8. **Мамонов С. В.** Тонкое гидравлическое грохочение — фактор повышения эффективности операций рудоподготовки и обогащения медно-цинковых руд // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 7. С. 85–89.
9. **Мамонов С. В., Цыпин Е. Ф., Братыгин Е. В.** Условия самоочистки просеивающей поверхности грохота для тонкого гидравлического грохочения // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 5. С. 106–111.
10. **Мамонов С. В.** Влияние технологий тонкой классификации на процесс флотации медных руд // IX Конгресс обогатителей стран СНГ, 25–27 февраля 2013.
11. **Пелевин А. Е.** Тонкое грохочение и его место в технологии обогащения железных руд // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. С. 110–117.
12. **Мордовин Д. Н., Алексанкин А. А., Ширяев А. А., Нескоромный Е. Н.** и др. Применение тонкого грохочения для повышения качества железорудного концентрата на обогатительной фабрике горно-обогатительного комплекса «Арселормиттал Кривой Рог» // Збагачення корисних копалин Науч.-тех. сб. 2011. Вып. 44(85). С. 62–67. 

*Tsvetnye Metally. 2021. No. 6. pp. 10–15*  
DOI: 10.17580/tsm.2021.06.01

#### FINE HYDRAULIC SCREENING OF GROUND ORES ON A MULTI-FREQUENCY SCREEN BY KROOSH TECHNOLOGIES: IN-PROCESS TESTING

##### Information about authors

G. M. Kosoy, Chief Ore Concentration Specialist<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, e-mail: [grigoryk@kroosh.com](mailto:grigoryk@kroosh.com)  
A. Ya. Vinnikov, Project Leader<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences

<sup>1</sup>Kroosh Technologies Ltd, Ashdod, Israel.

##### Abstract

This paper describes high-frequency screens developed by Derrick and Landsky and multi-frequency screens developed by Kroosh Technologies, how they function and the differences between them. The fundamental difference between the vibration parameters in the high-frequency and multi-frequency modes is the difference in the accelerations created by the vibration excitation system. In high-frequency screens, the maximum acceleration of the screening media does not exceed 10g. In multi-frequency screens, the measured positive and negative accelerations of the screen body are 3g. However, when interacting with the developed system of multi-frequency vibration, the positive peak accelerations of the screen mesh reach (50+60)g, and the negative accelerations — (150+200)g. This mode ensures that the screening media are kept free from material, and thus the specific throughput and the screening efficiency rise. A few dozens of tests with different ores were carried out on a pilot unit. The paper describes some qualitative and quantitative results of hydraulic screening of finely ground ores with 75 and 100 micron media, which were obtained on a pilot unit with a 1,500×600 mm multi-frequency screen. As a result of hydraulic screening of ground chrome ore with a 0.1×2.6 mm mesh at the ore feed rate of 2.65 t/(h·m<sup>2</sup>), the undersize product included 91.8% of particles smaller than 100 microns. With the hydraulic screening of ground chrome ore with a 0.075×2.6 mm mesh at the ore feed rate of 1.66 t/(h·m<sup>2</sup>), the recovery of particles smaller than 75 microns as the undersize product was 88.78%. With the hydraulic screening of ground tin ore with a 0.1×2.6 mm mesh at the ore feed rate of 2.94 t/(h·m<sup>2</sup>), the recovery of particles smaller than 100 microns as the undersize product was 93.93%. Multi-frequency screens are successfully used by the concentrator plants of Kazzinc and Glencore (South Africa).

**Key words:** high-frequency screen, multi-frequency screen, polyurethane sieve, acceleration of screening media, cleaning, hydraulic screening, pilot unit, specific capacity, recovery, undersize product.

##### References

1. Albuquerque L., Wheeler J., Valine S., Ganahl B., Barrios G. Application of high frequency screens in closing grinding circuits. *XXIII Encontro Nacional de Minerals e Metalurgia Extractiva*. 2009. pp. 167–173.
2. De Lado M., Diaz G., Chambi R. Expansion de produccion de condestable com innovaciones tecnologicas de classification de molienda. *XXVIII Convencion Minera Extemin*. Peru, 2007. pp. 3–33.
3. Chernova E. V., Chernov D. V. Current status and application of fine screening technology in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 87. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022005.
4. Krush I. I., Borokhovich D. E., Kosoy G. M. Application of the Kroosh technology for separation of bulk materials and polydisperse suspensions. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Fascicle. No. 14. 2009. pp. 171–183.
5. Kosoy G., Kroosh Y., Slavutin M. Development of multifrequency sieve analyzer. Available at: <https://grigorykosoy.academia.edu/research#papers> (Accessed: 20.05.2021).
6. Gazaleeva G. I., Mamonov S. V. The current status and capability of fine screening for the beneficiation of non-ferrous metal ores. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2013. No. 1. pp. 139–146.
7. Tsy-pin E. F., Mamonov S. V., Vlasov I. A. The products of classification and fine screening of a closed-loop copper-zinc ore grinding circuit. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2016. No. 2. pp. 4–11.
8. Mamonov S. V. Fine hydraulic screening as a factor contributing to copper-zinc ore conditioning and concentration performance. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2012. No. 7. pp. 85–89.
9. Mamonov S. V., Tsy-pin E. F., Bratygin E. V. The conditions for surface self-cleaning of the screen designed for fine hydraulic screening. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2014. No. 5. pp. 106–111.
10. Mamonov S. V. The effect of fine classification techniques on the flotation of copper ores. *9<sup>th</sup> Congress among Concentrators from CIS*. 25–27 February 2013.
11. Pelevin A. E. Fine screening and its role in the beneficiation of iron ores. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2011. No. 4. pp. 110–117.
12. Shiryayev A. A., Neskormnyi E. N., Mironenko A. I., Samokhina S. A., Starykh S. S. Application of fine screening to enhance the quality of iron ore concentrate at the concentrator plant of the ArcelorMittal Kryvyi Rih complex. *Enrichment of minerals: Sci. techn. collect*. 2011. Vol. 44(85). pp. 62–67.