



Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Всероссийский научно-исследовательский институт  
минерального сырья им. Н.М. Федоровского»  
(ФГБУ «ВИМС»)

**ИНФОРМАЦИОННО-  
АНАЛИТИЧЕСКИЕ  
МАТЕРИАЛЫ:**  
МИРОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ  
РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ, ТЕХНИКИ И  
ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

СЕРИЯ:  
ОБОГАЩЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

МОСКВА, 2020 Г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ИМ. Н.М. ФЕДОРОВСКОГО»  
(ФГБУ «ВИМС»)

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ:  
МИРОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ, ТЕХНИКИ  
И ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

**Серия: Обогащение минерального сырья**

МОСКВА  
РИС ВИМС  
2020

**Материал подготовили:**

Курков А.В.

Ануфриева С.И.

Соколова В.Н.

Кыджы М.В.

Чепрасов И.В.

Троицкий А.В.

Гришаев Г.С.

Каплин А.И.

**Информационно-аналитические материалы: Мировые достижения развития методов, техники и технологий переработки минерального сырья. Серия: Обогащение минерального сырья. М.: Изд-во ВИМС, 2020. — 52 с.**

Развитие современных высокотехнологических направлений отечественной экономики требует проведения постоянного анализа мировых достижений в области технологий переработки минерального сырья с целью внедрения их в практику освоения объектов отечественной минерально-сырьевой базы. В сборнике представлены примеры применения современного оборудования и технологий, перспективных для эффективного использования в области обогащения различных видов отечественного минерального сырья (за период 2019–2020 гг.).

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РУДОПОДГОТОВКИ С СЕЛЕКТИВНЫМ РАСКРЫТИЕМ ПОЛЕЗНЫХ МИНЕРАЛОВ .....	4
2. ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ КРУПНОКУСКОВОГО ОБОГАЩЕНИЯ .....	13
3. ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ: ГРАВИТАЦИОННОЕ И МАГНИТНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ, В Т.Ч. ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОНКОЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА.....	23
4. ФЛОТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СЕЛЕКТИВНЫХ РЕАГЕНТОВ И ЭФФЕКТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	35
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	43

# 1. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РУДОПОДГОТОВКИ С СЕЛЕКТИВНЫМ РАСКРЫТИЕМ ПОЛЕЗНЫХ МИНЕРАЛОВ

В циклах рудоподготовки труднообогащаемого, структурно-неоднородного сырья эффективным является применение оборудования, в котором в результате свободного удара достигается селективное разрушение материала по границам сростаний минеральных фаз и микротрещинам. К такому оборудованию относится усовершенствованная разновидность конусной дробилки — *гирационная дробилка*, ведущими поставщиками которой являются такие фирмы как Sandvik (Швеция), Metso Minerals (Финляндия), FLSmidth (Дания), KRUPP (Германия), Shenyang Huayue Brilliant Machinery & Equipment Co. Ltd (Китай) [1–7].

Гириционная дробилка сочетает в себе принцип действия двух традиционных дробилок — щековой и конусной (оснащены гладкими рабочими органами — конусом и щеками) и позволяет проводить более селективную дезинтеграцию при минимальном ошламовании.

Принцип действия гириционных дробилок отличается от традиционной конусной дробилки и основан на приведении во вращательно-маятниковое движение оси конуса дробилки при помощи эксцентриковой подшипниковой втулки. В результате происходит постоянное изменение величины зазора между щеками и конусом дробилки. Образующийся зазор непрерывно перемещается вдоль внутреннего периметра дробильной камеры [5, 8, 9].

Общий вид дробилки представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 — Общий вид гириционной дробилки

Гириционные дробилки, выпускаемые фирмой FLSmidth, представлены двумя моделями:

– модель NT («Bottom Service» — нижнее обслуживание) имеет тяжелый литой стальной корпус, кованные главный и промежуточный валы, долговечные (износостойкость ~10 лет) бронзовые компоненты, усиливающие её конструкцию, а также двигатель бóльшей мощности, что

приводит к увеличению производительности без увеличения размера оборудования [2];

– модель TS («Top Service» — верхнее обслуживание) отличается от других гирационных дробилок своей усовершенствованной конструкцией, которая позволяет безопасно выполнять основные функции технического обслуживания, а именно легко снять эксцентриковый узел, втулки и гидравлический поршень через верхнюю часть дробилки. Функция «Top Service» обеспечивает преимущества безопасности, которых нет на машинах с нижним обслуживанием. В результате это снижает общие материальные затраты и физическую нагрузку для обслуживающего персонала, тем самым обеспечивая непрерывную работу и исключая простои оборудования [3].

Дробилки моделей NT и TS предназначены для работы как на открытых рудниках и каменоломнях, так и под землей в шахтах, могут работать в различном климате от тропического до арктического, что особенно актуально для руд месторождений, которые находятся на территории России в районах Крайнего Севера (вечной мерзлоты).

Немецкая фирма KRUPP также выпускает две модели гирационной дробилки:

– модель KB, в которой регулировка зазора осуществляется гидравлическим или механическим регулированием оси конуса. Наиболее часто к гидравлическому регулированию оси конуса приходится прибегать в случае дробления материала, вызывающего быстрый износ (медные шлаки, побочные продукты черной и цветной металлургии, содержащие ценные компоненты и др.), а также при частой корректировке величины разгрузочной щели. Кроме того, гидравлическая система облегчает повторный запуск дробилки под завалом за счет опускания оси конуса;

– модель BK характеризуется увеличенным с одной стороны загрузочным отверстием. Оно снабжено зубьями и вместе с верхним конусом дробилки образует зону предварительного дробления. В нижней камере дробления происходит измельчение материала до требуемого конечного размера зерен. Гирационные дробилки типа BK способны принимать материал с существенно большими размерами кусков (1500–3350 мм), чем дробилки модели KB [4, 5].

Все современные гирационные дробилки оснащены усовершенствованным редуктором и гидромуфтой. Преимуществом этой схемы привода является значительное снижение пиковых значений тока, что приводит к безопасности эксплуатации оборудования и экономному потреблению электроэнергии.

Анализ современных схем рудоподготовки и использования современного оборудования в промышленных условиях показывает широкое внедрение и распространение зубчатых валковых дробилок различных конструкций как за рубежом, так и в отечественной практике для дробления самых разнообразных по крепости материалов (графит, каолин, гранит, корунд и др.) (рисунок 2).



А



Б



В

Рисунок 2 — Различные конструкции стальных резцов (зубьев) шнекозубчатой дробилки:

А — для крепких пород, где  $f=5-20$  (мрамор, гранит, кремнистые сланцы, железные, хромовые руды и др.); Б — для средних пород,  $f=3-5$  (известняк, сланцы, марганцевые, оловянные руды и др.); В — мягких пород,  $f=0,3-3$  (глина, торф, уголь др.)

*Примечание:  $f$  — коэффициент крепости по Протодьяконову*

Возможность перерабатывать материалы, склонные к налипанию на рабочих органах, выгодно отличает **шнекозубчатые дробилки (ДШЗ)** от других типов дробильного оборудования, так как шнековое расположение зубьев (рисунок 2) обеспечивает эффект самоочистки дробящих элементов и внутреннего пространства, а также позволяет обеспечить устойчивую работу дробилки «под завалом» [10–13].

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик дробилок является величина износа дробящих элементов и срок их службы. Средний срок службы литых стальных резцов (зубов) составляет от трех до шести месяцев [10, 14, 15].

Шнекозубчатые дробилки обладают важнейшими положительными качествами: низкой степенью переизмельчения материала и максимально высоким выходом товарных классов. Руда после дробления на ДШЗ пригодна не только для процессов дальнейшей дезинтеграции и промывки с последующей переработкой по классическим схемам, но и в качестве конечного продукта рудоподготовки для кучного выщелачивания. Дробилка ДШЗ является аппаратом калибрующего типа, поэтому не требуется

контрольное грохочение после процесса дробления. Предварительное дробление песков с высоким содержанием пластовой глины в виде сферических образований приводит к существенному сокращению времени последующей промывки [12, 13, 16, 17]. Так предварительная дезинтеграция глинистых песков Туганского месторождения на ДШЗ привела к снижению времени последующей промывки в скруббер-бутаре с 480 до 80 сек [10, 11].

Включение шнекозубчатой дробилки с последующей промывкой материала в схему рудоподготовки лежалых хвостов (флюоритовые руды) на Ярославском ГОКе с содержанием глины до 60 % позволило получить отмытую руду с содержанием глины менее 0,5 % и вовлечь ее в переработку по схеме существующей фабрики.

Внедрение шнекозубчатых дробилок на руднике Жалымбет корпорации «Казахалтын» позволило вовлекать в переработку руды с высоким содержанием глины в круглогодичную переработку. Применение дробилок при формировании штабеля для кучного выщелачивания позволяет получить материал с гранулометрическим составом, который обеспечивает наилучшую фильтруемость штабеля при минимальной продолжительности процесса.

Одним из перспективных направлений применения дробилок ДШЗ является их использование при переработке материала шламохранилищ и смерзшихся концентратов после транспортировки и хранения. Опыт эксплуатации дробилок для смерзшихся концентратов на Амурском заводе АО «Полиметалл» показал их эффективную работоспособность при любом состоянии дробимого материала [10, 18, 19].

При замене на предприятии «Тамме Ауто» (Эстония) молотковой дробилки на ДШЗ-500 потребляемая дробилкой электрическая мощность за счет снижения переизмельчения исходного продукта снизилась на 20 %. Коэффициент использования дробилки вырос с 0,3 до 0,86 за счет исключения залипания продукта на рабочих поверхностях [10, 11].

**Ударная дробилка с вертикальным валом (ротором) (VSI)** — это современное высокопроизводительное дробильное оборудование с гидравлическим устройством открывания крышки (рисунок 3). Данный аппарат может не только дробить минеральное сырье и горные породы, но также позволяет регулировать крупность получаемого конечного продукта. Благодаря своей конструкции VSI значительно повышает эффективность производства и качество конечного продукта, а также значительно снижает производственные затраты и расходные материалы.

Частицы материала в камере дробилки движутся следующим образом:

- под действием силы тяжести;
- под действием ударов по ним рабочими ударными элементами;
- под действием центробежной силы;
- в результате отражения от внутренних стенок рабочей камеры дробилки и соударения частиц между собой.





Рисунок 3 — Общий вид ударной дробилки с вертикальным ротором

Дробилки могут быть оснащены различными формами роторов и вращающихся дисков (импеллеров), каждый из которых подбирается по индивидуальным критериям в зависимости от сырья (его крепости, вещественного состава, влажности и т.д.) и для регулирования гранулометрии конечного дробленого материала. Коэффициент дробления в основном зависит от скорости вращения ротора, также может регулироваться путем замены шкивов (для более частых изменений). Геометрия движения ротора разработана так, чтобы при дроблении материала исключалось переизмельчение, а разрушение происходило по природным границам срастания минералов [20]. Параметры рабочего элемента и его скорость должны быть подобраны так, чтобы обеспечивалось максимально возможное вложение энергии ударного элемента на выполнение полезной работы, т.е. на разрушение частицы материала.

Ударная дробилка с вертикальным ротором в основном используется для среднего и мелкого дробления твердых, средних и мягких минералов и горных пород (таких как железные, бокситовые руды, руды цветных металлов, кварцевый песок, известняк, полевошпат, гранит, базальт, диабаз, каменная крошка, корунд, кальцит, тальк, барит, глина, томбартит, каолин, перлит, гипс, графит и др.), влажной и липкой руды. Максимальный размер куска в приемном бункере в зависимости от типоразмера дробилки составляет 250–800 мм, а производительность — 100–650 т/ч. Эти дробилки внедрены на предприятиях по производству бетона, в стекольной промышленности, при получении кварцевых песков, при дроблении железной, медной и бокситовой руд, продуктов переработки металлургических предприятий [21–24].

Электромагнитные аппараты с вихревым слоем ферромагнитных частиц были предложены еще в 1967 г. Логвиненко Д.Д. и Шеляковым О.П. [25]. Постепенно в мире возрастает интерес к развитию этого процесса [26–28].

*Аппарат с вихревым слоем ферромагнитных элементов (аппарат вихревого слоя)* представляет собой рабочую камеру (трубопровод) диаметром 60–330 мм, расположенную в индукторе вращающегося электромагнитного поля (ЭМП). В рабочей зоне трубопровода содержатся цилиндрические ферромагнитные элементы диаметром 0,5–5 мм и длиной 5–60 мм в количестве от нескольких десятков до нескольких тысяч штук (0,05–20 кг) в зависимости от рабочей зоны аппарата (рисунки 4, 5) [Р29].

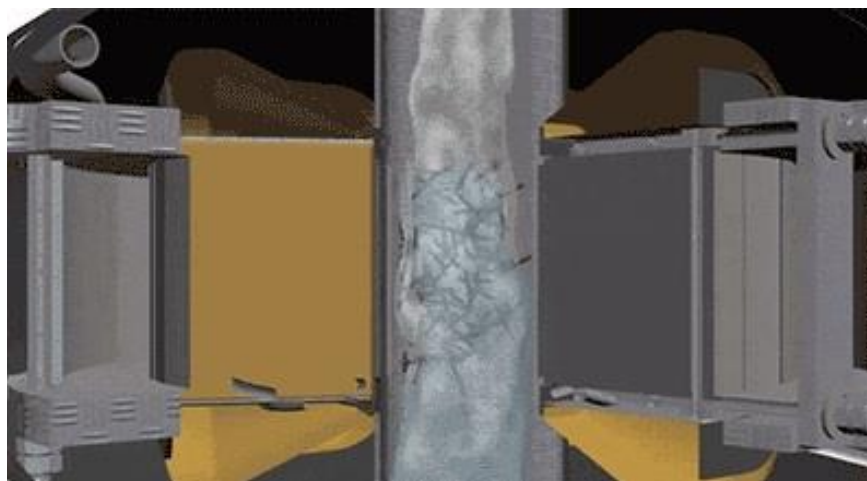


Рисунок 4 — Аппарат с вихревым слоем ферромагнитных элементов (аппарат вихревого слоя)

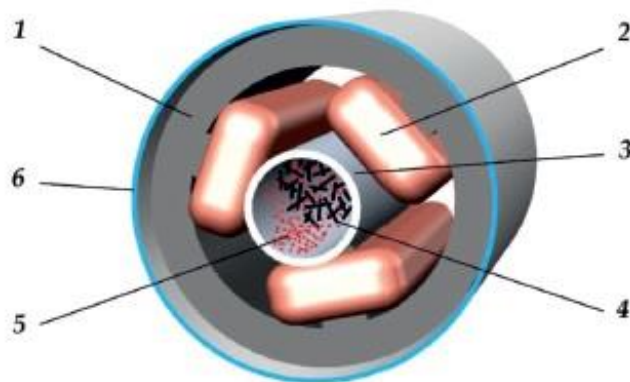


Рисунок 5 — Типовая конструкция аппарата с вращающимся ЭМП:  
 1 — магнитопровод индуктора; 2 — трёхфазная обмотка индуктора; 3 — немагнитный цилиндрический корпус рабочей зоны аппарата; 4 — ферромагнитные иглы;  
 5 — обрабатываемый материал

Основной параметр, характеризующий работу аппарата с вихревым слоем, — внутренний диаметр индуктора вращающегося магнитного поля. Работа этих аппаратов основана на интенсивном воздействии на перерабатываемые материалы — хаотично движущегося слоя ферромагнитных частиц, которые приводятся в действие вращающимся электромагнитным полем.

Эффект интенсификации технологических процессов и химических реакций достигается за счет интенсивного перемешивания и диспергирования компонентов, которые подвергаются акустической и электромагнитной обработке, высокому локальному давлению, электролизу. Применение аппаратов с вихревым слоем ферромагнитных частиц позволяет ускорять протекание реакций в 1,5–2 раза, сократить расход реагентов и электроэнергии на 20 %, повысить качество продукции и ее выход [30, 31].

Усовершенствование конструкций аппаратов с вихревым слоем приводит к созданию универсальных конструкций аппаратов, поэтому области их использования непрерывно расширяются. Кроме химической и нефтехимической отраслей промышленности, аппараты с вихревым слоем все чаще применяются в смежных с ними отраслях целлюлозно-бумажной, горно-химической, пищевой, микробиологической, а также в производствах полимерных материалов, стройматериалов, электротехнических изделий, алмазных и абразивных инструментов, в порошковой металлургии, для очистки сточных вод.

В процессе рудоподготовки эффект измельчения определяется характером движения ферромагнитных элементов в рабочей камере аппарата. Измельчение частиц обеспечивается как свободным их соударением с ферромагнитными элементами, так и в результате стесненного соударения между двумя элементами или элементом и корпусом. Степень измельчения составляет 0,5 мкм (при начальном размере фракции 20 мм). С помощью аппаратов ЭМП могут измельчаться и доизмельчаться каменный уголь, алюмосодержащие шлаки, кварцевый песок, технические алмазы, целлюлоза, мел, древесная мука, фторопласты и др.

В аппаратах с вихревым слоем можно совмещать как основные технологические процессы, например, измельчение и смешивание, измельчение, сушку и классификацию материала, смешивание и сушку, так и основные операции со вспомогательными [27, 28, 32].

Основные направления совершенствования конструкций аппаратов с вихревым слоем — увеличение их единичной мощности, разработка встроенных устройств для повышения эффективности переработки сыпучих материалов, регулирование температуры в рабочей камере, обеспечение условий взрывобезопасности, использование твердомеханических и коррозионностойких покрытий рабочих элементов, должен быть исключен вынос ферромагнитных частиц из рабочей зоны, готовая смесь после выхода ее из вихревого слоя не должна разделяться, а также совершенствование системы автоматического управления [27].

Производителем аппаратов вихревого слоя является немецкая компания ООО «GlobeCore» с непосредственным производством на заводе ООО «Укрбудмаш» (Украина, г. Полтава) и возможностью приобретения оборудования в г. Курск, а также ООО «АППАРАТ-НН» (г. Дзержинск, Нижегородская обл.) [33, 34].

Аппараты вихревого слоя имеют небольшую производительность (до 30 м<sup>3</sup>/час), однако в настоящее время созданы аппараты производительностью 100–1000 м<sup>3</sup>/час.

Развитием направления тонкого измельчения стало появление и внедрение высокопроизводительного оборудования единичной мощностью до 3,5–5,0 мВт и производительностью до 800 т/ч. **Современные высокоэффективные мельницы с перемешиванием мелющей среды** применяются для тонкого помола полиметаллических, железных руд и их концентратов, где требуется раскрытие ценных компонентов до крупности 20–30 мкм, для последующих процессов обогащения и/или перед гидрометаллургической переработкой. Эффективное измельчение на таком оборудовании достигается за счет использования в процессе дезинтеграции руды шаров малого диаметра (до 2 мм), что позволяет многократно увеличить общую площадь измельчающей поверхности (среды) в несколько раз по сравнению с обычными шаровыми мельницами. Крупность исходного питания мельниц тонкого измельчения составляет –5 мм, стандартная крупность готового продукта 20–30 мкм. При переработке различных типов руд экономия энергии при использовании такого оборудования увеличивается на 35–40 % по сравнению с традиционными шаровыми мельницами [35].

Современное промышленное оборудование для тонкого измельчения представлено вертикальными мельницами Vertimill производства Metso Minerals и HIGmill производства Outotec (бисерные мельницы) (рисунок 6). В мире на горнодобывающих предприятиях установлено и эксплуатируется более 600 мельниц данного типа (США, Конго, Финляндия, Панама, Чили и др.) [35].



Рисунок 6 — Вертикальные мельницы тонкого измельчения: А — тип Vertimill (Metso); Б — тип HIGmill (Outotec)

В настоящее время в России реализуются проекты с использованием самых мощных (производительных) мельниц Vertimill (Metso), производительностью до 800 т/ч (ГМК «Норникель»), (Группа НЛМК).

В мировой практике в последнее десятилетие для оценки эффективности работы мельниц и контроля гранулометрического состава материала после процесса тонкого измельчения получили широкое применение ультразвуковые (акустические) и лазерные (оптические) гранулометры непрерывного действия.

Принцип действия ультразвуковых приборов основан на том, что при прохождении через пульпу частично поглощаются звуковые волны, обуславливая необратимые потери их энергии. Принцип действия лазерных приборов основан на использовании лазерной дифракции, измерении углового распределения интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через пульпу. Данные, полученные вышеописанными методами, регистрируются, обрабатываются, в результате чего получают гранулометрическую характеристику материала.

Основными типами гранулометров для горнодобывающих предприятий являются (рисунок 7):

- ультразвуковые PSM-400MPX фирмы Thermo Scientific (Австралия) [36];
- лазерные PSI-500i фирмы Outotec (Финляндия), CEOPS фирмы СЕМТЕС (Австрия) [33, 37].



Рисунок 7 — Гранулометры: А — PSM-400MPX (Thermo Scientific);  
Б — PSI-500i (Outotec); В — CEOPS (СЕМТЕС)

Гранулометры позволяют непосредственно в контурах рудоподготовки в режиме реального времени контролировать гранулометрический состав пульп после измельчения по нескольким классам крупности в диапазоне: для ультразвуковых от 1000 до 25 мкм; для лазерных от 2500 до 0,5 мкм [36–38].

Использование нового технологического оборудования в процессах подготовки руд к обогащению, в циклах тонкого измельчения и доизмельчения концентратов, а также в процессах тонкого измельчения материала перед гидрометаллургическими процессами позволяет:

- повысить раскрываемость зерен минералов крупностью 20–30 мкм и, как следствие, улучшить качество концентратов и извлечение ценных компонентов в последующих операциях обогащения;
- снизить энергозатраты в узле измельчения и доизмельчения;
- оптимизировать работу контура измельчения, поддерживая размер частиц в заданном диапазоне крупности.

Всё вышеприведенное энергоэффективное оборудование для цикла рудоподготовки (дробление, измельчение, классификация) представлено в таблице 1.

## **2. ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ КРУПНОКУСКОВОГО ОБОГАЩЕНИЯ**

В области крупнокускового обогащения развитие идет по пути совершенствования сенсорных датчиков и разработки новых технологических решений, заключающихся в комбинации методов предварительного обогащения. Наиболее применяемым в мире в настоящее время является метод рентгеноабсорбционной сепарации.

Наибольшее развитие за последние 10 лет получили следующие методы радиометрической сепарации:

- рентгенорадиометрический (рентгенофлуоресцентный, рентгеноспектральный, гамма-флуоресцентный; в иностранной литературе: X-Ray fluorescence sorting, XRF sorting);
- рентгеноабсорбционный (РАМ; в иностранной литературе: X-Ray transmission sorting, XRT sorting);
- фотометрический (оптический, цветной, ФМ; в иностранной литературе: optical sorting, color sorting, photometric sorting);
- индукционно-радиорезонансный метод (радиоабсорбционный; в иностранной литературе EM sorting, electromagnetic sorting);
- ближнеинфракрасный метод (в зарубежной литературе near infrared sorting, NIR sorting).

Примеры использования современных решений в области предварительного крупнокускового обогащения приведены в таблице 2.

### *Рентгеноабсорбционная сепарация*

Крупнейшая в мире фабрика Waad Al Shamal по радиометрическому обогащению фосфатов запущена в Саудовской Аравии, производительность фабрики по исходному сырью составляет 1800 т/ч, на ней установлены девять рентгеноабсорбционных сепараторов руды на основе датчиков TOMRA COM XRT 2.0. В хвосты выделяется более 70 % материала, содержащего кремнезем. Внешний вид фабрики представлен на рисунке 8 [39].

## Современные решения в области рудоподготовки

Современные образцы оборудования, производитель	Преимущества	Примеры использования
<b>ЦИКЛ ДРОБЛЕНИЯ</b>		
<p><b>ШНЕКОЗУБЧАТАЯ ВАЛКОВАЯ ДРОБИЛКА (ДШЗ), «Hazemag» (Германия); OSBORN ENGINEERED PRODUCTS SA (PTY) LTD (Южная Африка); компания «Mining Advice» (Великобритания); компания «ГОРМАШЭКСПОРТ» (Россия, г. Новосибирск); ООО «Тулские машины» (Россия, г. Тула); ООО «Геотранском» (Россия, г. Ростов-на-Дону); горная компания «Логинов и партнеры» (Украина, г. Киев); ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод (НКМЗ)» (Украина)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– простота конструкции;</li> <li>– высокая производительность при компактности и низкой металлоемкости;</li> <li>– минимальное ошламование;</li> <li>– возможность использования для глин и глинистых руд, тонкодисперсных илов;</li> <li>– способность дробящих поверхностей к самоочищению, что позволяет устойчиво дробить влажные материалы;</li> <li>– система автоматического реагирования попадания внутрь аппарата недробимых материалов;</li> <li>– предназначена для дробления твердых и хрупких горных пород с пределом прочности на сжатие 3000 кг/см<sup>3</sup>;</li> <li>– принцип работы — разрушение материала «в слое»</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Промышленное</b></p> <p><i>за рубежом:</i> на предприятиях по переработке угля, графитовых, железных, марганцевых, бокситовых, полиметаллических, золотосодержащих руд, извести, строительных материалов; <i>в РФ:</i> Гурьевская ОФ «Евраз» (крепкий известняк), ЗИФ «Казахалтын» (золотоносная руда), карьер Мурунтау Навоийского ГМК (Узбекистан) (золотоносная руда), Тугнуйская ОФ «СУЭК» (уголь с включениями кварцевых пород), ОФ Коксовая «ТопПром» (уголь с крепкими цементированными песчаниками)</p>
<p><b>УДАРНАЯ ДРОБИЛКА С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РОТОРОМ (VSI), Metso (Финляндия); SANDVIK (Швеция); Mag'Impact (Бельгия); МДМ (Китай); Meka (Германия); Samyoung (Южная Корея), Zenith Minerals (Китай); Terex — Canica (США); «Новые технологии инжиниринг» (Санкт-Петербург, аналог Metso)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– высокая скорость дробления, эффективность работы (не зависит от влажности исходного материала) до 97 %;</li> <li>– устройство автоматической блокировки молота при попадании негабарита;</li> <li>– ударный блок в форме ромба предотвращает переизмельчение материала;</li> <li>– стабильная производительность по заданной крупности конечного продукта;</li> <li>– регулируемое разгрузочное отверстие;</li> <li>– оснащена двигателем с высокой степенью защиты, который отличается высокой эффективностью и низким уровнем шума;</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Промышленное</b></p> <p><i>за рубежом:</i> на предприятиях по производству бетона, стекольной промышленности, кварцевых песков, дроблению железной, медной и бокситовой руды, продуктов переработки металлургических предприятий</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– не требует установки специального фундамента, простота конструкции и обслуживания;</li> <li>– длительный срок службы;</li> <li>– прочная конструкция аппарата;</li> <li>– невысокое потребление электроэнергии, низкие эксплуатационные расходы</li> </ul>	
<p><b>АППАРАТ С ВИХРЕВЫМ СЛОЕМ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (АППАРАТ ВИХРЕВОГО СЛОЯ)</b>  немецкая компания ООО «GlobeCore» с непосредственным производством на заводе ООО «Укрбудмаш» (Украина, г. Полтава) и возможностью приобретения оборудования в г. Курск, а также ООО «АППАРАТ-НН» (г. Дзержинск, Нижегородская обл.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– увеличивает площадь измельчающей поверхности (среды);</li> <li>– крупность измельченного продукта — 20–30 мкм;</li> <li>– позволяет ускорять протекание реакций в 1,5–2 раза;</li> <li>– сокращает расход реагентов;</li> <li>– совмещение в одном аппарате нескольких операций: измельчение и смешивание, измельчение, сушку и классификацию материала, смешивание и сушку, а также основные операции со вспомогательными;</li> <li>– повышает качество продукции на 2–3 %;</li> <li>– энергоэффективен, экономит потребляемую энергию на 40 %;</li> <li>– производительность до 800 т/ч</li> </ul>	<p><b>Промышленное</b>  <i>за рубежом:</i> применяются для тонкого помола полиметаллических, железных руд и их концентратов, где требуется раскрытие ценных компонентов до крупности 20–30 мкм для последующих процессов обогащения и/или перед гидрометаллургической переработкой</p>
<b>ЦИКЛ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ</b>		
<p><b>ВЕРТИКАЛЬНАЯ МЕЛЬНИЦА VERTIMILL, Metso Minerals (США, Финляндия) и БИССЕРНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ МЕЛЬНИЦЫ HIGmill, Outotec (Финляндия)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– крупность исходного питания –6 мм;</li> <li>– крупность готового продукта — 20–30 мкм;</li> <li>– энергоэффективна, экономит потребляемую энергию на 35–40%;</li> <li>– производительность до 800 т/ч;</li> <li>– обладает высокой эффективностью для подготовки материала к гидрометаллургическим процессам</li> </ul>	<p><b>Промышленное</b>  <i>за рубежом:</i> (Конго, Финляндия, Панама, Чили, Аргентина, США и др.) в цикле рудоподготовки полиметаллических и железных руд. в РФ: на Талнахской обогатительной фабрике, Быстринский ГОК (ПАО «Норильский никель»), планируется внедрить на Стойленском ГОКе (4 квартал 2019 г. – 2 квартал 2020 г.)</p>
<b>ЦИКЛ КЛАССИФИКАЦИИ</b>		
<p><b>УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ГРАНУЛОМЕТРЫ PSM-400MPX</b> фирмы Thermo Scientific (Австралия) и <b>ЛАЗЕРНЫЕ ГРАНУЛОМЕТРЫ PSI-500i</b> фирмы Outotec (Финляндия), <b>СЕОПС</b> фирмы SEMTEC (Австрия)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– размер определяемых частиц 1000–25 и 2500–0,5 мкм;</li> <li>– позволяют в режиме реального времени контролировать гранулометрический состав пульпы после измельчения одновременно по нескольким классам крупности;</li> <li>– автоматизированная система</li> </ul>	<p><b>Промышленное</b>  <i>за рубежом:</i> (Финляндия, Чили, Аргентина, США, Канада, Австралия и др.) в цикле измельчения и классификации различного вида минерального сырья</p>



## Современные решения в области крупнокускового обогащения

Оборудование	Производитель, разработчик	Примеры использования
Рентгеноабсорбционный сепаратор	Tomra Sorting GmbH	Waad Al Shamal (фосфаты, Саудовская Аравия); Lucara Diamond Karowe mine (алмазы, Ботсвана); San Rafael (олово, Перу); Ixtaca (золото, Мексика); Eastern Chrome (хромовые руды, ЮАР); ТОО «Гамма» (уголь, Казахстан)
	Steinert GmbH	Karratha (золото, Австралия); Вертикальное м-е (серебро, РФ); Саткинское м-е (магнезит, РФ)
Фотометрический сепаратор	Tomra Sorting GmbH	Анненский рудник (медные руды, Казахстан); Mikroman (кварц, Турция)
Рентгенорадиометрический сепаратор	ООО «Интегра Груп Ру» Tomra Sorting GmbH	Жесказганское м-е (медные руды, Казахстан)
Индукционно-радиорезонансный сепаратор	Steinert GmbH	Mc Creedy East, Beta Hunt (медно-никелевые руды Канада)
Ближнеинфракрасный сепаратор	Tomra Sorting GmbH	Cullinan (алмазы, ЮАР)



Рисунок 8 — Радиометрическая фабрика Waad Al Shamal по переработке фосфатного сырья

Горнодобывающая компания Lucara Diamond Corporation стала широко известной в ноябре 2015 г., когда на одной из шахт в Ботсване ею был добыт второй по величине в мире из когда-либо найденных алмазов — алмаз массой 1 111 карат, названный впоследствии «Lesedi la Rona». На следующий

день после объявления об обнаружении камня массой 1 111 карат компания сообщила о находке на том же месторождении алмазов массой 813 и 374 карат. Камень массой 813 карат, позже получивший наименование «Созвездие», 9 мая 2016 г. был продан компанией за 63 111 111 долларов США. В результате камень стал самым дорогим среди когда-либо продававшихся необработанных алмазов. Алмаз «Созвездие» был найден с использованием рентгеноабсорбционного сепаратора компании Tomra Sorting Solutions (рисунок 9) [40].



Рисунок 9 — Алмаз «Созвездие»

Метод рентгеноабсорбционной сепарации на месторождении San Rafael (Перу) был внедрен в 2016 году. Сепарация применена для переработки отвалов производства предыдущих лет. В качестве основного оборудования для рентгеноабсорбционной сепарации использованы четыре сепаратора Tomra COM Tetriary XRT. Крупность подаваемого на сепарацию материала составляет  $-60+7$  мм, материал при этом подвергается грохочению на 4 класса крупности, каждый из которых сепарируется отдельно. В результате сепарации из продукта, содержащего 0,6 % олова, выделяется 81 % отвальных хвостов от операции, при этом содержание олова в концентрате рентгеноабсорбционной сепарации составляет 2,8 %. Концентрат затем поступает на гравитационно-флотационное обогащение [41].

В настоящее время на серебряном месторождении Вертикальное завершается стадия промышленных испытаний компанией ЗАО «Прогноз» совместно с ЗАО «НПП ГеоТестСервис» с применением в качестве основного оборудования сепаратора Steinert KSS T. На сепаратор поступают первичные и окисленные руды. Оценка прогнозных технологических показателей рентгеноабсорбционной сепарации показала возможность выделения 47,9 % отвальных хвостов, содержащих 9,4 г/т серебра, потери с ними составляют 1,6 %. Содержание в концентрате составило 546,9 г/т.

Исследования рентгеноабсорбционной сепарации золотосодержащих руд с применением сепаратора Steinert KSS T выполнены на рудах массива

Cariboo (Канада). Золото на рудах данного массива связано преимущественно с сульфидной минерализацией. Исследования сепарации по атомной плотности сульфидов проводились на пробах руд, отобранных с 4 месторождений Shaft, Cow, Mosquito и Valley, переработка которых планируется совместно. Были рассчитаны результаты сепарации по объединенным пробам: из руды, содержащей 6 г/т золота, было получено 38,4 % хвостов, содержащих 0,7 г/т золота, потери золота с хвостами составили 3,8 % [42].

На месторождении сульфидных золото-серебряных руд Ixtaca (Мексика) применяется рентгеноабсорбционная сепарация. Пример результатов измерения кусков руды месторождения Ixtaca на рентгеноабсорбционном сепараторе Tomra Com Tetriary XRT представлен на рисунке 10. В результате сепарации из руды, содержащей 0,74 г/т золота и 65 г/т серебра, получен концентрат, содержащий 1,03 г/т золота и 95 г/т серебра. Выход хвостов при этом составляет 45,5 % от машинного класса крупности, потери золота с ним составляют 12 %, серебра — 7 % от операции [43].

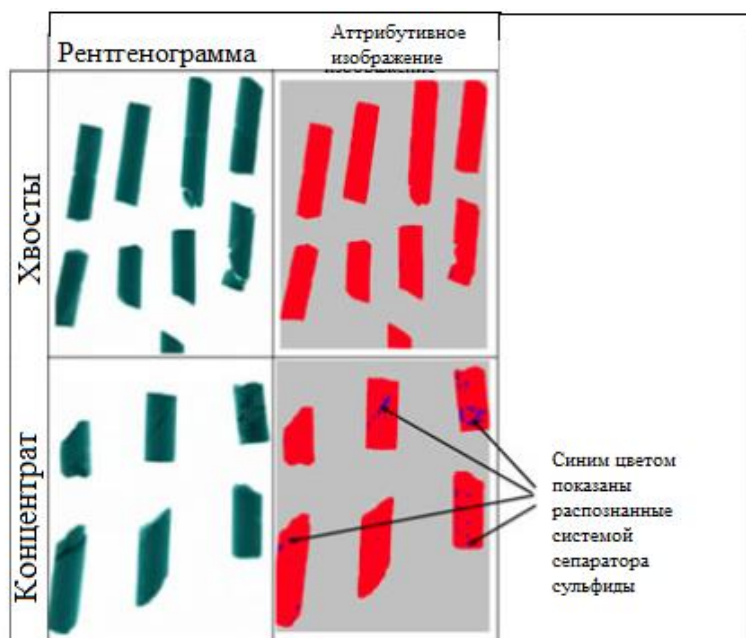


Рисунок 10 — Пример распознавания сульфидов рентгеноабсорбционным методом на кусках месторождения Ixtaca

Рентгеноабсорбционная сепарация применяется для получения магнезита в России на Саткинском месторождении. При переработке магнезитового сырья различного качества на сепараторе Steinert XSS(T) 100 получают магнезитовый концентрат (содержание  $\text{SiO}_2$  не более 1,1 %,  $\text{CaO}$  не более 2,1 %), соответствующий требованиям производства изделий рядовых марок [44].

Рентгеноабсорбционная сепарация с применением сепараторов компании Tomra Sorting GmbH на оловянных рудах месторождения Ororpesa (Испания), разрабатываемом компанией Elementos Limited, позволила повысить содержание олова в обогащенном продукте рентгеноабсорбционной

сепарации, поступающем на фабрику, в 1,24 раза, выход хвостов при этом составил 25 % [45].

Рентгеноабсорбционная сепарация была успешно внедрена на месторождении хромовых руд Eastern Chrome (ЮАР). Применение современных рентгеноабсорбционных сепараторов Tomra COM XRT 2.0, работающих в диапазоне крупности от 6 до 120 мм, позволило отказаться от применения тяжелосредной сепарации для переработки бедных хромовых руд. В результате сепарации из материала, содержащего 28 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , в одну стадию был получен концентрат, содержащий 38–40 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , хвосты рентгеноабсорбционной сепарации при этом содержат 12 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [46].

ТОО «Гамма» с 2014 года применяет рентгеноабсорбционные сепараторы TOMRA COM Tertiary XRT 1200 на своей угольной шахте в Баянаульском районе Павлодара (Казахстан). Внедрение сепараторов осуществлялось компанией Tomra Sorting GmbH совместно с компанией ЗАО Тране Текникк (Россия). В результате сепарации при разделении фракций крупностью –100+25 мм коксового угля с зольностью 16,5–17,5 % был выделен концентрат с зольностью менее 10,7–11,0 % и выходом 65 и 70 % соответственно. При сепарации угля марки Т (тощего) крупностью –100+10 мм с зольностью 39–42 % получен концентрат с зольностью менее 26–32,5 % с выходом 60 и 70 % соответственно. При сепарации угля этой же марки, доведенного до крупности –70+25 мм, зольность концентрата составила 8,2 % при его выходе 60 %. Сепарация антрацита класса крупности –80+13 мм с зольностью 11,1 % позволила получить концентрат с зольностью менее 4,3 % при его выходе 80 % [47].

На золоторудном месторождении Karratha (Австралия) была исследована возможность применения рентгеноабсорбционных сепараторов XSS T компании Steinert. Из машинных классов крупности, содержащих 2,3 г/т золота, удалось выделить более 90 % отвальных хвостов, содержание в концентрате при этом составило 12,1 г/т золота [48].

#### *Фотометрическая сепарация*

Компанией Tomra Sorting GmbH в 2018 году на 2 фабриках по производству кварца компании Mikroman (Турция) в провинциях Мугла и Айдын были установлены лазерные фотометрические сепараторы. В провинции Усак на предприятии совместно с лазерными сепараторами были установлены оптические фотометрические сепараторы, ввиду того, что сырье на данном месторождении характеризуется бóльшей степенью загрязненности. В результате переработки методами предварительного обогащения совместно с ручной рудоразборкой получают следующие продукты: белый и светло-серый кварц с низким содержанием оксида железа для использования в качестве декоративных камней; серый и желтый кварц для использования в стекольной промышленности; цветной кварц для производства ферросилиция, используемого металлургическим сектором, цветной гравий и отвальные хвосты [49].

Лабораторные пробы медной руды из зон обрушения Анненского рудника были исследованы в ЗАО «Тране Текникк» с целью оценки

возможности применения метода фотометрической сепарации. В результате сепарации из руды, содержащей 0,84 % Cu, было получено 12 % хвостов, содержащих 0,34 % Cu при потерях 4,8 %. Содержание в концентрате при этом составило 0,9 % Cu. Экономическими расчетами показана высокая экономическая эффективность внедрения технологии фотометрической сепарации [50].

Фотометрическая сепарация применяется на месторождении магнезита в деревне Грокова (Польша). Объект разрабатывается компанией Magnezyty Grochów SA. Фотометрическая сепарация позволяет отделить магнезит от серпентинита. В результате сепарации получается товарный магнезит, который применяется в химической промышленности, производстве многокомпонентных удобрений, металлургической промышленности в качестве компонента огнеупорной массы, а также в фармацевтической промышленности [51].

#### *Рентгенорадиометрическая сепарация*

Исследования по оценке возможности применения рентгенорадиометрической сепарации были проведены на товарной руде обрушенных и ослабленных участков Жезказганского месторождения с содержанием меди до 0,3 %, относящейся к очень бедным рудам. На рентгенорадиометрическом сепараторе компании ООО «Интегра Груп Ру» из руды, содержащей 0,16 % Cu, было выделено 31,6 % хвостов с содержанием Cu 0,02 % при потерях с ними 3,72 %, содержание в обогащенном продукте при этом составило 0,23 %. Расчеты показали, что экономическая эффективность применения рентгенорадиометрической сепарации достигается за счет снижения полной себестоимости 1 т катодной меди при сепарации рудной массы из зон обрушения на 10,8 %.

Тестовые исследования были проведены на установке компании TOMRA Sorting GmbH (Германия) на представительных выборках руд обрушенных и ослабленных участков Жезказганского месторождения класса крупности -40+20 мм с применением различных сенсоров. В результате исследований наибольшую эффективность признака разделения показал метод рентгенорадиометрической сепарации. При оценке этого метода на выборке кускового материала с содержанием Cu 0,16 % выход хвостов составил 73,7 % с содержанием в них 0,04 % Cu и потерями меди 18 %. Содержание Cu в концентрате при этом составило 0,5 % [50].

#### *Индукционно-радиорезонансный метод сепарации*

Значительный опыт применения радиометрических методов сепарации имеется при обогащении медно-никелевых руд. При этом за рубежом преимущественно применяется комбинированный индукционно-радиорезонансный и фотометрический метод. Следует отметить, что применительно к медно-никелевым и никелевым рудам при комбинации индукционно-радиорезонансного и фотометрического методов оптические детекторы чаще всего используются с целью определения геометрических характеристик кусков и их расположения, и реже, с целью оценки оптических характеристик материала.

Применение комбинированного метода сепарации на месторождении медно-никелевых руд Mc Creedy East (Онтарио, Канада) позволяет выделить из горной массы 77 % материала с отвальным содержанием меди и никеля, потери которых составляют менее 3 % [52].

При переработке медно-никелевых руд месторождения Beta-Hunt (Kambalda, Западная Австралия) электромагнитным методом сепарации выделяется отвальная фракция, выход которой составляет 20–40 % [53]. Исходная руда объемом 1000 т/сутки с содержанием никеля 0,5 % подается на сортировочный комплекс, где выделяется ~30 % отсева крупностью –20 мм с содержанием никеля 1–1,5 %. Еще ~30 % материала представляет крупный несепарируемый класс крупности +70 мм. Из машинного класса –70+20 мм объемом 400 т/сутки выделяется обогащенный продукт с содержанием 4 % Ni (рисунок 11) [54].



Рисунок 11 — Электромагнитный сепаратор на месторождении Beta-Hunt

На месторождении никелевых руд Sudbury Basin (Онтарио, Канада), принадлежащем компании CaNickel Mining Limited, были проведены испытания рентгеноабсорбционного и электромагнитного методов сепарации [55]. Применение предварительного обогащения позволит сократить затраты на стадии измельчения на 40 %. По сравнению с исходной рудой в обогащенном продукте сепарации содержание оксида магния уменьшается в два раза, что позволяет увеличить извлечение металлов в цикле флотации на 20 %.

#### *Ближнеинфракрасный метод сепарации*

Сепарация алмазосодержащих руд ближнеинфракрасным методом была применена на руднике Cullinan в ЮАР [56]. Перед сепарацией материал подвергается дроблению до крупности –180+0 мм и направляется на грохочение по классам крупности –180+60, –60+20 и –20+0 мм.

Класс крупности –180+60 мм без промывки направляется на первичную сепарацию ближнеинфракрасным методом с разделением

материала на концентрат и хвосты. Концентрат далее подается на фабрику, хвосты поступают на контрольную сепарацию с получением дополнительного концентрата и хвостов, направляемых в отвал. Класс крупности  $-60+40$  мм после грохочения разделяется на 2 потока, каждый из которых направляется на промывочный грохот, а затем на сепарацию ближнеинфракрасным методом. Класс крупности  $-20+0$  мм перерабатывается методом тяжелосредней сепарации.

Перспективным направлением является метод лазерной сепарации, который является более совершенным по сравнению со стандартной оптической сепарацией, где в качестве источника излучения используются светодиоды, а в качестве приемника сигнала — камеры. В современных моделях используются лазеры, которые одновременно являются и источником излучения, и сканирующим устройством для материала. На рисунке 12 представлен пример распознавания сепаратором кварцевой минеральной разности на куске. Лазерный сепаратор получает сильный сигнал от эффекта прерывания лазерного сигнала и может очень быстро вычислить кварцсодержащие области в куске. Гранитная вмещающая порода и большинство пегматита классифицируются как пустые ввиду практически полного отсутствия сигнала от эффекта прерывания исходного лазерного сигнала [40].



Рисунок 12 — Пример распознавания слабовыраженной кварцевой цветовой разности на куске лазерной системой сепаратора

Интенсивно распространяется метод рентгеноабсорбционной сепарации. За счет улучшения характеристик рентгеновской трубки, а также детекторов удалось реализовать метод, получивший у производителя (компания Tomra Sorting Solutions) наименование «COM XRT 2.0», который позволил создать самую высокопроизводительную радиометрическую фабрику в мире на примере фосфатного сырья [56].

### 3. ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ: ГРАВИТАЦИОННОЕ И МАГНИТНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ, В Т.Ч. ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОНКОЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

#### ГРАВИТАЦИОННОЕ ОБОГАЩЕНИЕ

Совершенствование гравитационных аппаратов ведется в направлении снижения их металло- и энергоемкости, повышения эксплуатационной надежности, использования новых материалов, упрощения конструктивных решений. Современные действующие образцы гравитационного оборудования, их преимущества и масштаб использования приведены в таблице 3.

Перспективным путем решения задачи повышения эффективности обогащения является применение воздушной сепарации (пневмосепарации). Преимущества данного метода обусловлены возможностью снижения материалоемкости, энергозатрат и уменьшения расхода технической воды.

В настоящее время развитием данного направления стали конструктивно усовершенствованные, автоматизированные, **пневматические сепараторы типа FGX и ПВС-1,4П** (рисунок 13), выпускаемые компаниями «Shenzhou» (КНР) и ООО «НПК «ЛЭМЗ-ОГМК» (Украина) соответственно.



Рисунок 13 — Пневматические сепараторы: А — FGX (КНР); Б — ПВС-1,4 (Украина)

Производительность сепаратора по исходному питанию достигает 400 т/ч, он предназначен для обогащения углей и других сыпучих материалов насыпной плотностью до 2,8 т/м<sup>3</sup>, крупностью –70+10 мм и с поверхностной влажностью до 10 %.

В России на предприятии АО «СУЭК» ШУ «Восточное» в 2010 г. для улучшения качества отгружаемого угля запущен в работу новый комплекс сухого пневматического обогащения FGX-12, который позволяет снизить зольность выпускаемой товарной продукции и получать новый продукт — концентрат, уголь коксующийся [57].

Развитием направления совершенствования технологии «сухой» отсадки является **отсадочная машина Allair**, изобретенная и запатентованная в 2000 г. компанией Allmineral (Германия), известной на российском рынке как производитель отсадочных машин Alljig для мокрого обогащения.



## Современные решения в области гравитационного обогащения

Современные образцы оборудования, производитель	Преимущества	Примеры использования
<p>Пневматические сепараторы: FGX «Shenzhou» (КНР); ПО «Расмин» (Россия); ПВС 1,4П ООО «НПК «ЛЭМЗ-ОГМК» (Украина)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– отсутствие потребления воды;</li> <li>– возможность эксплуатации в любых климатических условиях;</li> <li>– потребность в минимальном количестве зданий и сооружений;</li> <li>– возможности модульного исполнения;</li> <li>– небольшие сроки строительства и запуска в эксплуатацию;</li> <li>– сокращение капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с мокрыми процессами обогащения</li> </ul>	<p><b>Промышленное</b> более 600 ед. в КНР; 6 ед. в Украине; в РФ АО «СУЭК» ШУ «Восточное», ООО УК «Колмар» «Денисовская»</p>
<p>Отсадочная машина Allair® производства Allmineral (Германия)</p>		<p><b>Промышленное</b> более 60 установок в США, Индии, Испании, Турции Колумбии и др.; РФ — 1 установка</p>
<p>Комплекс пневматической сепарации «СЕПАИР» (Россия)</p>		<p><b>Промышленное</b> ООО «Разрез Бунгурский» (РФ), ТОО «Разрез Молодежный» (Казахстан) <b>Опытно-промышленное</b> Айхальский ГОК АК Алроса (РФ)</p>
<p>Концентратор Dove (концентрационный стол) для сухого обогащения (Таиланд)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– возможность эффективной обработки сложных руд, к которым нельзя применить мокрый процесс;</li> <li>– более низкая стоимость производства, чем при использовании концентраторов для мокрого обогащения;</li> <li>– более высокая чувствительность к различиям в плотности частиц, чем у концентраторов для мокрого процесса</li> </ul>	<p><b>Промышленное</b> обогащительные фабрики Малайзии, Индонезии и Юго-восточной Азии</p>
<p>Центробежный концентратор Михеева серии КПВ (Россия)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– отсутствие залипания рифлей на любых грунтах;</li> <li>– постоянное и естественное ворошение постели;</li> <li>– повышенное качество извлечения;</li> <li>– простота эксплуатации, которая практически не отличается от эксплуатации простого центробежного концентратора</li> </ul>	<p><b>Лабораторное</b> лаборатория Берёзовского рудника <b>Промышленное</b> золотые месторождения: Кулар (Якутия), россыпные (Нерюнгри, Читинская, Магаданская области)</p>

<p><b>Лабораторный сепаратор для разделения минералов фирмы SALTER CYCLONES (Великобритания)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– разделение минералов по плотности в диапазоне крупности –2+0 мм;</li> <li>– позволяет оценить показатели разделения фракций по плотности;</li> <li>– прогнозирование показателей тяжелосреднего обогащения и гравитационного обогащения на концентрационных столах и центробежных концентраторах</li> </ul>	<p><i>Лабораторное</i> Великобритания</p>
<p><b>Мультигравитационные сепараторы SCMG фирмы SALTER CYCLONES (Великобритания)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– надежная и проверенная на практике конструкция; тонкое и сверхтонкое разделение в диапазоне крупности от 100 до 17 микрон;</li> <li>– энергоэффективность;</li> <li>– минимальное обслуживание;</li> <li>– минимальный надзор;</li> <li>– не требует реагентов;</li> <li>– высокая степень концентрации</li> </ul>	<p><i>Лабораторное, промышленное</i> Великобритания</p>
<p><b>Магнитно-гравитационный сепаратор МГС-2.0 (Россия)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– возможность выделения высококачественного концентрата в начале технологической схемы;</li> <li>– экономию электроэнергии за счет сужения фронта измельчения;</li> <li>– снижение капитальных и эксплуатационных затрат</li> </ul>	<p><i>Промышленное</i> Оленегорский ГОК (АО «ОЛКОН»), планируется внедрение на АО «Карельский окатыш» и Яковлевском ГОКе</p>

Разделение материала на продукты в отсадочной машине Allair (рисунок 14) происходит при пульсирующей и постоянной подаче воздуха, причем воздух распределяется равномерно по всей площади деки, имеющей регулируемую частоту и амплитуду встряхивания [58]. Отсадочная машина Allair предназначена для обогащения угля крупностью до 50 мм. Максимальная производительность зависит от размера частиц исходного материала. Производительность однодечной установки 50 т/ч для крупного угля (6–50 мм) и 40 т/ч для мелкого угля (0–6 мм); двухдечной машины — 100 и 80 т/ч соответственно. Все операции сепарации автоматизированы.



Рисунок 14 — Конструкция и внешний вид пневматической отсадочной машины Allair компании Allmineral

В настоящее время на базе РПБ «КузбассСервис» (г. Мыски) проводится освоение мобильного обогатительного комплекса на основе сухой отсадочной машины Allair [59].

В России компанией «Гормашэкспорт» разработана перспективная технология гравитационного сухого обогащения для различного вида материалов с использованием **обогатительного комплекса «СЕПАИР»**. В его основе реализована технология процесса разделения продуктов по плотности в псевдооживленном слое с управляемой циркуляцией слоя [60, 61].

В комплексе «СЕПАИР» используется принцип, нереализованный ранее в пневматических сепараторах и «сухих» отсадочных машинах: разделение продуктов по плотности в восходящем потоке воздуха в вихревой камере (всасывание воздуха), расположенной над перфорированным полотном. Ранее данный процесс использовался для разделения волокнистых материалов: асбеста, мусора и т.д. Во время сепарации обеспечивается двукратное разделение по заданной границе плотности для каждого отдельно взятого зерна перерабатываемого материала в псевдооживленном слое при высокой производительности процесса (рисунок 15). Установка позволяет производить разделение исходного материала на продукты, различающиеся по плотности на  $0,01\text{--}0,1\text{ т/м}^3$ . Производительность сепаратора варьируется в пределах от 100 кг/ч до 100 т/ч. Производительность одной технологической линии — от 300 т/ч и более [60–62].

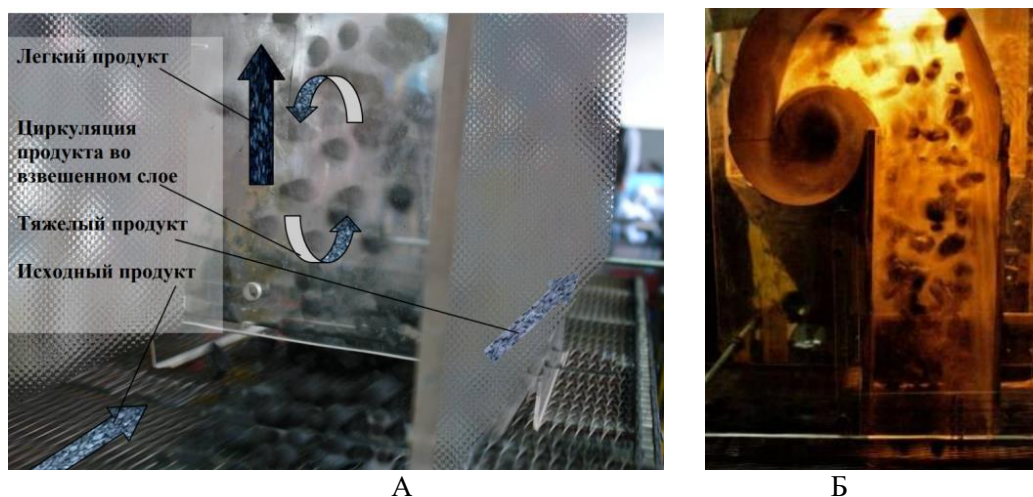


Рисунок 15 — А — Пилотная установка «Сепайр-1-05», процесс сепарации;  
 Б — Псевдооживленный («кипящий») слой в вихревой камере

Обогащение угля ведется на продуктах, прошедших предварительную классификацию по классам крупности, например, 1–4, 4–10, 10–25, 25–50 и 50–100 мм. В одной установке возможно получение нескольких продуктов различной плотности, например, низкосольный уголь, уголь средней зольности, промпродукт и отходы [63]. При равных объемах переработки угля стоимость одной фабрики, использующей сухое обогащение, в 5–10 раз меньше традиционной при очень низких эксплуатационных затратах.

По результатам проведенной оценки данный процесс сепарации позволяет получать хорошие результаты на операциях предварительного обогащения и доводки при небольших затратах в технологиях переработки высокосольного угля, алмазосодержащего сырья, некондиционных бокситов, слюд, руд цветных металлов и металлургических шлаков [64–71].

**Концентратор Dove** производства тайской фирмы DOVE Equipment & Machinery Co., Ltd. предназначен для разделения полезных ископаемых по их плотности в сухом режиме без использования воды (рисунок 16) [64].



Рисунок 16 — Концентратор Dove (DC-500)

На его работу влияет плотность загружаемого материала, а также его крупность. Для эффективной работы плотность извлекаемого материала должна превышать  $2,8 \text{ г/см}^3$ .

Процесс разделения идет за счет действия поступательного движения вибрирующей поверхности и подающегося через нее непрерывного потока воздуха в контролируемой конфигурации.

Для обработки подходит рассыпчатый материал с размером частиц менее 2 мм (10 меш). Неоднородный по размеру частиц материал должен быть разделен на фракции крупности, и каждая фракция обработана отдельно. Однородность частиц по крупности необходима для эффективной работы концентратора [72].

Концентратор оснащен различными регуляторами, которые позволяют контролировать работу путем настройки воздушного потока, длины хода деки, скорости, продольного наклона рабочей поверхности и скорости подачи материала.

Производительность концентрационного стола в зависимости от модели (DC-500 и DC-1000) составляет 350–1000 кг в час. Фактическая производительность зависит от характеристик питания и требуемого качества продукции. Производительность может изменяться в зависимости от объемной плотности и крупности руды, характера загружаемого материала и эксплуатационных характеристик стола.

В России создана одна из наиболее эффективных конструкций центробежных концентраторов — **концентратор переменного вращения (КПВ)**. Чаша концентратора является свернутым в конус старательским лотком, в котором разрыхление обеспечивается сдвигом лотка относительно породы (пульпы), тем самым размывая грунт и давая мелким и тяжелым частичкам осесть на дно. В данном случае лоток закольцован, разделяющая сила и частота возвратно-колебательных движений на порядок больше, процесс загрузки и отвод хвостов непрерывен [73]. Концентратор работает на оборотной воде, имеет небольшую массу и малую мощность электропривода (рисунок 17).



Рисунок 17 — Концентратор переменного вращения

Суть нового, запатентованного принципа заключается в том, что чаша постоянно меняет свою скорость относительно потока пульпы. За 1 сек происходит 10 циклов смены скорости вращения чаши. Так, например, при средних оборотах чаши 600 об/мин (не изменяются) она 0,05 сек разгоняется, сдвигаясь по отношению к потоку на  $\sim 35^\circ$ , затем столько же тормозится, сдвигаясь в противоположном направлении от потока на те же  $\sim 35^\circ$ . Материал, прижатый центробежной силой к дну рифли, увлекается за чашей, но отстает от нее, смещаясь относительно смежных слоев [73].

Существует два варианта исполнения концентратора — КПВ-100 и КПВ-300. Производительность КПВ-100 — до 70 кг/ч, мощность электродвигателя — 0,12 кВт. Он хорошо зарекомендовал себя для работы в лабораториях, геологоразведке и доводке шлихов. Производительность КПВ-300 — до 2000 кг/ч, мощность электродвигателя — 1,1 кВт. Этот сепаратор предназначен для широкого промышленного применения.

**Лабораторный сепаратор для разделения минералов британской фирмы SALTER CYCLONES LTD** применим в области обогащения полезных ископаемых и металлургии (рисунок 18). Он быстро и эффективно разделяет минеральные зерна с близким удельным весом [74].



Рисунок 18 — Лабораторный сепаратор для разделения минералов

Сепаратор поставляется с двумя легкозаменяемыми лотками из нержавеющей стали, обеспечивающими эффективное разделение в широком диапазоне класса крупности  $-2+0$  мм. Конструкция V-образного профиля лотка способствует смещению тяжёлой фракции к глухой части этого лотка, это позволяет не только подтверждать результаты гравитационного анализа с использованием тяжелых жидкостей, но и возможность работать в более высоких диапазонах центробежного поля (рисунок 19). Сепаратор эффективно используется для лабораторных испытаний на классе крупности  $-2+0,1$  мм (рисунок 19(I)). При разделении на V-образном профильном лотке

возможно точно предсказать производительность концентрационного стола при обработке гидравлически классифицированных продуктов. Это имеет большое значение для оптимизации гравитационной технологии на промышленных обогатительных фабриках.

Конструкция плоского лотка позволяет эффективно разделять тонкий материал крупностью  $-0,1+0$  мм (рисунок 19(II)). Это актуально для прогнозирования обогащения шламов, когда крупность материала исключает использование тяжелой жидкости для предварительной оценки гравитационных свойств.

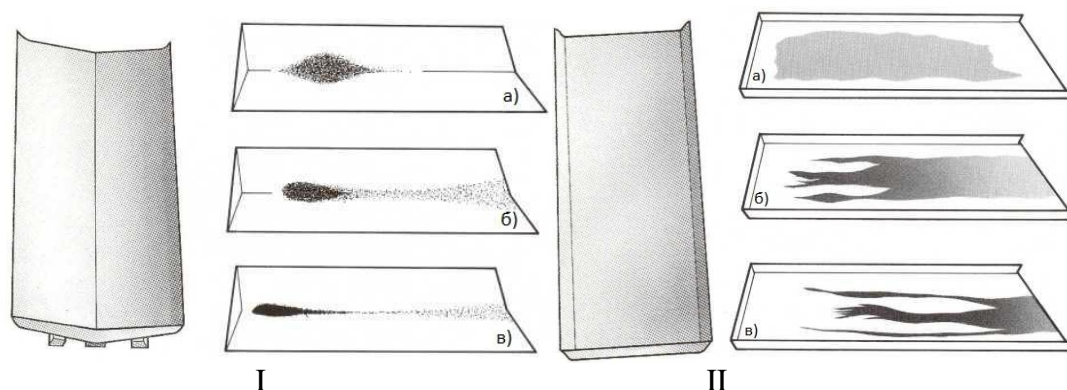


Рисунок 19 — I — Конструкция V-образного профиля лотка с разделением на нём материала крупностью  $-2+0,1$  мм: а) образец помещен на лоток и смочен; б) частичное разделение через 0,5 мин; в) полное разделение через 3 мин  
 II — Конструкция плоского профиля лотка с разделением на нём материала крупностью  $-0,1+0,01$  мм: а) пульпа помещена на лоток; б) частичное разделение через 1 мин; в) полное разделение через 5 мин

Мультигравитационные сепараторы фирмы SALTER CYCLONES улучшают извлечение тяжелых минералов шламовой крупности, теряющихся с хвостами (рисунок 20).

Эти сепараторы применяются в различных областях: от извлечения драгоценных металлов и минералов олова, хрома, меди, цинка и т.д. до обогащения нерудных минералов, таких как барит, целестин и флюорит. При этом неподдающиеся обработке тонкие классы угля и хвосты обогащения могут быть дополнительно обогащены без использования реагентов [75].



Рисунок 20 — Мультигравитационный сепаратор SCMG3, устройство барабана в мультигравитационном сепараторе

Принцип работы можно сравнить с усиленными по своему действию компактными концентрационными столами. Однако в мультигравитационном сепараторе обычная горизонтальная разделяющая поверхность концентрационного стола обернута в конический барабан, который при быстром вращении создает усиленное гравитационное поле, идеальное для извлечения ультратонких тяжелых частиц. Мультигравитация или «продвинутое» гравитационное обогащение обеспечивает высокую эффективность с непрерывным извлечением ценных минералов из тонких и ультратонких фракций. Это предоставляет дополнительную возможность получения концентратов высокого качества с высокой степенью извлечения из низкосортных хвостов и промпродуктов обогащения.

В настоящее время доступны три модели мультигравитационного сепаратора — компактная лабораторная/пилотная установка SCMG1, полноразмерные SCMG2 и SCMG3, предназначенные для работы при высокой производительности. SCMG2 и SCMG3 оснащены двойными барабанами, имеют запатентованную технологию привода коробки передач, которая предполагает повышенную надежность, минимальное обслуживание, компактную конструкцию.

**Магнитно-гравитационный сепаратор МГС-2.0** («бочка Зеленова») является усовершенствованной версией аппарата МГС, разработанного в СССР в 1970–1980-х гг. Это продукт совместной деятельности конструкторского бюро ООО «Обогащательное оборудование» и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Горного института Кольского научного центра Российской академии наук. В настоящее время в России начат его промышленный выпуск на площадке завода «Рудгормаш» (рисунок 21). Представленная модель сепаратора предназначена для мокрого разделения тонкоизмельченных сильномагнитных руд по крупности, плотности и магнитной восприимчивости с получением тонкозернистого магнитного продукта. Величина частиц разделяемого материала составляет не более 0,2 мм. Сепаратор работает в ручном и автоматическом режиме, с возможностью регулировки расхода воды и напряженности поля [76].



Рисунок 21 — Магнитно-гравитационный сепаратор МГС-2,0



Магнитно-гравитационный сепаратор включает цилиндроконический корпус из немагнитного материала, приспособления для подачи исходной суспензии, промывной воды и вывода продуктов разделения, магнитную систему, установленную снаружи и внутри корпуса. Магнитная система выполнена в виде соосно расположенных электромагнитных катушек, что обеспечивает создание низкоградиентного магнитного поля [77].

Сепаратор дает возможность выделить высококачественный концентрат в начале технологической схемы, что позволит освободить технологические мощности после первой стадии обогащения, даст большую экономию электроэнергии за счет сужения фронта измельчения и снизит капитальные и эксплуатационные затраты.

Данный сепаратор в 2019 г. показал высокую эффективность на рудах Оленегорского ГОКа (АО «ОЛКОН»), позволил повысить качество получаемого концентрата непосредственно на секциях обогащения с 66 до 70 % по содержанию железа без операций его доводки. [78, 79].

## **МАГНИТНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ**

В практике обогащения минерального сырья появляются новые, более совершенные конструктивные решения магнитных сепараторов с постоянными магнитами. Новое оборудование магнитной сепарации и примеры его использования представлены в таблице 4.

**Мокрый магнитный сепаратор барабанного типа (IFE)** (см. таблицу 4, № 1) имеет прорезиненное или полиуретановое покрытие (вместо нержавеющей) корпуса вращающегося барабана с неподвижной магнитной системой.

Барий-ферритовые или неодимовые магниты расположены на магнитном теле таким образом, что создается переменная полярность по окружности корпуса барабана. Корпус магнита расположен внутри барабана и крепится к валу. Проходя через переменное магнитное поле, магнитный материал наиболее эффективно подвергается очистке от немагнитных частиц, что повышает содержание и извлечение полезного компонента в концентрат на 5–8 %. Магнитная индукция подбирается под требования заказчика и может варьироваться от 0,4 до 1,4 Тл. Сепаратор обладает скоростной удвоенной подачей материала в питатель, имеет автоматическую систему оповещения при попадании негабаритов в приемный бункер питания. В зависимости от конструкции сепаратора подача материала происходит прямоточно или противоточно. Установка двойных барабанов используется для достижения более высокой производительности [80–83].

Данный сепаратор применяется за рубежом при переработке железных, марганцевых, хромовых руд, на металлургических заводах (обработка шлака, выделение тонких магнитных частиц), песчано-гравийной смеси, а также при переработке и утилизации отходов (для выделения металлической составляющей) [80–82, 84, 85].

## Современные решения в области магнитного обогащения

№ п/п	Изображение оборудования	Современные образцы оборудования, производитель	Преимущества
1		<p>МОКРЫЙ МАГНИТНЫЙ СЕПАРАТОР БАРАБАННОГО ТИПА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОНКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ, IFE Aufbereitungstechnik GmbH (Австрия), STEINERT (Германия), Eriez (США), Nippon Magnetics, Inc. (Япония)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выделение тонких минеральных частиц;</li> <li>– не обладает намагничивающим действием, т.е. не флокулирует тонкие частицы;</li> <li>– магнитная система изготавливается из барий-феррита или неодима;</li> <li>– магнитная система изготавливается на заказ (по требованию покупателя);</li> <li>– подача материала осуществляется через резервуар, оснащенный антивибрационным действием, что исключает просыпание материала через борта приемника;</li> <li>– конструкция прямоточной и противоточной подачи материала;</li> <li>– имеет низкие эксплуатационные расходы и прост в обслуживании.</li> </ul>
2		<p>Сепаратор ПБС(М)ц 22/8 (РФ)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– очистка полиминеральных смесей от магнитоактивных частиц, получения высококачественных магнитных концентратов;</li> <li>– магнитная система выполнена на основе постоянных магнитов Nd-Fe-B;</li> <li>– возможность работы без электричества.</li> </ul>
3		<p>Полупромышленный сепаратор ПВМ Промышленный сепаратор 2ПВМ 100 НПО «ЭРГА» (РФ)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– индукция магнитного поля постоянных магнитов составляет 1–1,5 Тл;</li> <li>– снижает электропотребление;</li> <li>– регулируемая индукция магнитного поля;</li> <li>– применяется для слабомагнитных руд (вольфрамовых, ильменитовых, апатит-нефелиновых).</li> </ul>

**Сепаратор ПБС(М)ц 22/8** (отечественная разработка, МГГУ) (см. таблицу 4, № 2) предназначен для выделения сильномагнитной (ферромагнитной) фракции из шлиховых концентратов в доводочных технологических схемах на ШОФ (Шлихообогатительная фабрика), ШОУ (Шлихообогатительная установка), ЗПК (золотоприемная касса), может быть применен при проведении минералогических анализов и обработке геологических проб. Сепаратор может быть использован также для получения богатых магнетитовых концентратов (суперконцентратов), необходимых при производстве магнитных жидкостей. Сепаратор удобен для использования в лабораторных условиях, полевых условиях при проведении ГРР, в старательских артелях. Отличительной особенностью сепаратора ПБС(М)ц является высокая селективность процесса разделения в нем полиминеральных смесей по магнитным свойствам с извлечением полезного компонента (золота) в немагнитный продукт не менее 90 % (в зависимости от формы и размеров частиц Au), а также возможность осуществления процесса сепарации как в сухом, так и в мокром режимах.

В сепараторе ПБС(М)ц высокое извлечение Au в немагнитную фракцию достигается сочетанием «бегущего» магнитного поля высокой частоты, значительных по величине центробежных сил (как результат вращения круговой магнитной системы и барабана во встречных направлениях) и многократной в результате этого, пролонгированной перемешивающей магнитной фракции.

В зависимости от режима сепарации возможна поставка сепаратора в одном из трех исполнений: для сухого режима ПБСц 22/8, для мокрого — ПБМц 22/8 и комбинированного (мокрый-сухой режим) — ПБС(М)ц 22/8У (универсальный) [86].

Исходя из потребностей горно-обогатительных комбинатов в относительно дешевом и надежном в эксплуатации оборудовании, требовалось создание высокоиндукционных магнитных систем с использованием постоянных магнитов. Результатом научно-исследовательских работ и предварительных расчётов стала разработка полупромышленного сепаратора ПВМ мокрого типа с замкнутой системой и регулируемой магнитной индукцией в рабочей зоне сепарации от 1,0 до 1,5 Тл, производства НПО «ЭРГА» [87].

Работа сепаратора ПВМ осуществляется по следующему принципу. Поступающая в питающую коробку сепаратора пульпа равномерно распределённым потоком подаётся в ванну, где попадает в область магнитного поля, создаваемого размещёнными внутри валка и ванны неподвижными магнитными системами. Находящиеся в потоке пульпы слабомагнитные включения под воздействием магнитного поля притягиваются к магнитным концентраторам валка и перемещаются с помощью вращающейся обечайки в зону разгрузки, где под действием механических отсекающих или напора воды, подаваемой через расположенные вдоль магнитного вала форсунки, сбрасываются в разгрузочный жёлоб.

Испытания сепарации вольфрамовых, ильменитовых, апатит-нефелиновых руд на полупромышленной модели ПВМ показали работоспособность разработанного оборудования и высокое извлечение минералов со слабой магнитной восприимчивостью в магнитную фракцию.

На основании полученных данных разработан промышленный сепаратор 2ПВМ 100 (см. таблицу 4, № 3) производительностью до 10 т/ч и возможностью увеличения количества стадий магнитной сепарации [88].

Дальнейшие исследования на марганцевых, хромовых, окисленных железистых и других слабомагнитных рудах позволят оптимизировать сепаратор для определенного типа перерабатываемого материала.

Одним из направлений совершенствования процесса магнито-жидкостной сепарации (МЖС) является разработка центробежных магнито-жидкостных сепараторов. Ускорение в центробежных полях, как известно, может в десятки и сотни раз превышать ускорение гравитационного поля. Под действием выталкивающей магнитной и центробежной сил происходит разделение смеси, при этом более плотные частицы за счет центробежной силы прижимаются к поверхности ротора, образуя слой концентрата, а менее плотные под действием выталкивающей магнитной силы устремляются к центру ротора. Эти сепараторы подходят для тонкозернистого материала за счет высокой центробежной силы [89–94].

#### **4. ФЛОТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СЕЛЕКТИВНЫХ РЕАГЕНТОВ И ЭФФЕКТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В области флотационного обогащения развитие идет по пути совершенствования флотационного оборудования и разработки новых технологических решений, заключающихся в использовании нескольких методов обогащения в одном аппарате и разработке новых экологически безопасных селективных реагентов.

##### **Совершенствование флотационного оборудования**

Примеры использования современных решений в области флотационного обогащения приведены в таблице 5.

##### *Технология гибридной флотации*

Компанией Siemens совместно с Primetals Technologies (Австрия) разработана новая технология флотации — гибридная флотация для обогащения тонкого материала [95, 96].

Флотомашина предназначена для флотации полиметаллических (Cu, Mo, Zn, Ni, Au, Ag и пр.) и железных руд крупностью частиц –10 мкм для основной флотации и –75 мкм для контрольной флотации. Производительность единицы оборудования составляет 100–400 м<sup>3</sup> пульпы/ч при содержании в ней до 48 % твердого.

## Современные решения в области флотационного обогащения

Оборудование	Производитель, разработчик	Примеры использования
Флотомашина гибридная Simine	Siemens, Primetals Technologies (Австрия)	<i>Промышленное</i> Antofagasta Minerals, Collahuasi, Codelco Division Andina (Чили), ОАО «Святогор», ОАО «Челябинский цинковый завод» (Россия), «Рудметал» АД, (Болгария)
Комбинированные пневматические флотомашины серии КФМ	Учебно-проектный центр «Проектный институт» материаловедения и металлургии (ИММТ) (Россия)	
Монокамерная пневматическая флотационная машина (МПФМ)	Институт «Якутнипроалмаз» (группа «Алроса») (Россия)	<i>Промышленное</i> Мирненский, Айхальский, Удачный ГОКи (группа «Алроса»)
Гидрофлот-сепаратор	Eriez Flotation Division, Canadian Process Technologies (Канада)	<i>Промышленное</i> Канада, Австралия, США установлено более 50 единиц в мире
Колонные флотомашины «CoalPro» и StackCell»	Eriez Flotation Division, Canadian Process Technologies (Канада)	<i>Промышленное</i> Канада, Австралия, США, Россия

Комплекс основного оборудования включает в себя флотомашину без мешалки с тремя насосами, что позволяет на 70 % снизить потребление электроэнергии по сравнению с обычными флотационными системами сопоставимой производительности. Схема и общий вид машины представлены на рисунке 22.

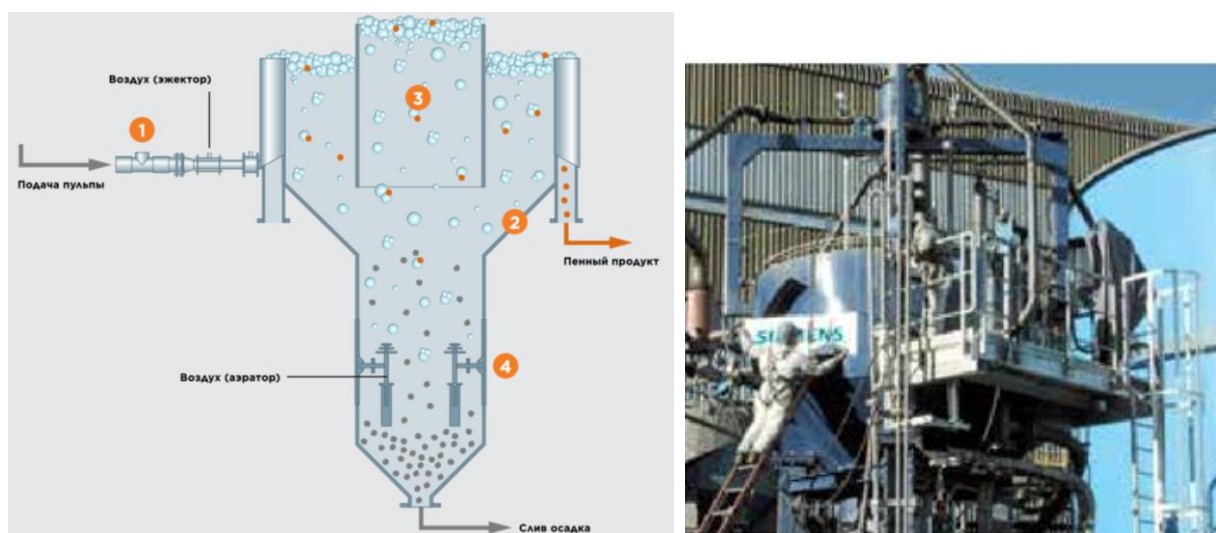


Рисунок 22 — Гибридная флотационная машина типа Simine<sup>CIS</sup>

Машина позволяет осуществлять одновременно две операции: основной флотации за счет эжекции воздуха в первом контуре аэрации по извлечению более мелких частиц и контрольной флотации во втором контуре аэрации с применением аэратора другого типа для извлечения более крупных частиц. Данное решение позволяет исключить дополнительную операцию

контрольной флотации и существенно увеличить эффективность обогащения в одном аппарате [96].

В настоящее время технология гибридной флотации внедрена и успешно эксплуатируется для переработки сульфидных медно-молибденовых руд, на предприятиях Antofagasta Minerals, Collahuasi, Codelco Division Andina (Чили). Ведется работа по внедрению технологии для обогащения железных руд (удаление кремнезема, сернистых и фосфорных материалов из мелкой фракции перерабатываемого сырья) [95, 96].

Направление комбинированных флотационных машин (КФМ) сформировано в России. Первые флотомашины серии КФМ были внедрены еще в конце 90-х годов [97]. Следует отметить, что первая флотомашинка Simine была изготовлена в 2007 году по переданному фирме Siemens международному патенту и чертежам российских авторов (№ WO 2006/061265 A1, М.Г. Видуецкий, И.Ф. Гарифулин, В.А. Мальцев). В настоящее время это направление развивается учебно-проектным центром «Проектный институт материаловедения и металлургии» (ИММТ), г. Екатеринбург.

Разработанные комбинированные пневматические флотомашинки КФМ предназначены для обогащения широкого спектра руд и техногенного сырья, в том числе неметаллических полезных ископаемых. Принцип работы машин основан на использовании флотогравитационного эффекта, что позволяет за счет исключения противотока и турбулентных потоков пульпы извлекать минеральные зерна крупностью 0–0,6 мм. Производительность машин КФМ достигает до 500 м<sup>3</sup>/ч при плотности пульпы до 40 % твердого.

Общий вид машины представлен на рисунке 23.

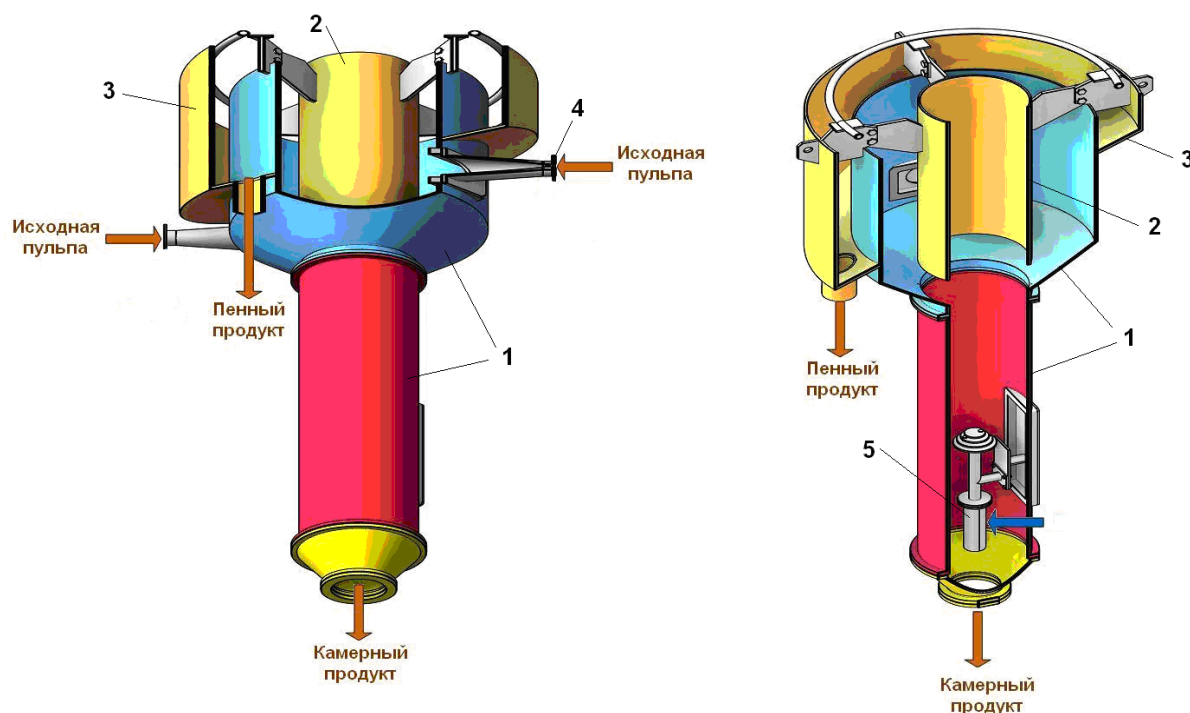


Рисунок 23 — Общий вид и наименование основных узлов флотомашин серии КФМ  
1 — корпус (рабочая камера) флотомашинки; 2 — центральная труба; 3 — пенный желоб; 4 — эжектирующие устройства (1-ый уровень аэрации); 5 — аэрирующие устройства (2-ой уровень аэрации); 6 — система автоматического управления

В настоящее время промышленные флотомашины серии КФМ внедрены на предприятии Los Pelambres (Чили), перерабатывающем медно-молибденовые руды, ОАО «Святогор» (г. Красноуральск), перерабатывающем медно-цинковые руды, ОАО «Челябинский цинковый завод» для обогащения цинковых кеков и предприятия «Рудметал», (г. Рудозем, Болгария) для обогащения свинцово-цинковых руд [98].

Преимущества гибридной флотации в колонной машине типа Simine<sup>CIS</sup> и флотационных машинах серии КФМ в сравнении с обычными флотационными системами:

- увеличение извлечения мелких и сверхмелких частиц при высокой степени обогащения;
- высокая производительность при малом объеме, малая высота (не более 5 м), сокращение производственных площадей (до 70 %);
- малое время пребывания материала в объеме флотомашин;
- отсутствие движущихся частей в конструкции;
- два уровня аэрации для исключения противотока и турбулентных движений потоков пульпы;
- объединение двух операций флотации в одной машине, что позволяет снизить фронт флотации, производственные площади, потребление воды и электроэнергии.

#### *Технология крупнозернистой флотации*

В России институтом «Якутнипроалмаз» (группа АЛРОСА) для обогащения алмазосодержащего сырья крупностью  $-2,0+0,2$  мм была создана и промышленно используется монокамерная пневматическая флотационная машина большой единичной производительности, широкое промышленное внедрение данного оборудования позволило увеличить извлечение алмазов крупностью  $-2,0$  мм на 12–30 % [99].

В настоящее время зарубежной компанией Eriez Flotation Division и ее подразделением Canadian Process Technologies разработана флотационная установка нового типа — гидрофлот-сепаратор, которая предназначена для извлечения крупных минеральных частиц из практически любого типа минерального сырья [100].

Производительность единицы промышленного оборудования составляет 25–550 т/ч. Исходным питанием для гидрофлот-сепаратора являются пески классифицирующего гидроциклона первой стадии измельчения. Гидрофлот-сепаратор эффективно извлекает частицы в интервале крупности 0,30–2,0 мм, а максимальный предел крупности для обогащения калийных руд 3,0 мм, для сульфидных руд 2,0 мм [101]. Схема и общий вид машины представлены на рисунке 24.

Принцип работы установки основан на использовании аэрированного взвешенного слоя, пузырьки воздуха рассеиваются системой псевдооживления, просачиваются через минеральную постель, прикрепляются к гидрофобным частицам и извлекают их в пенный продукт.

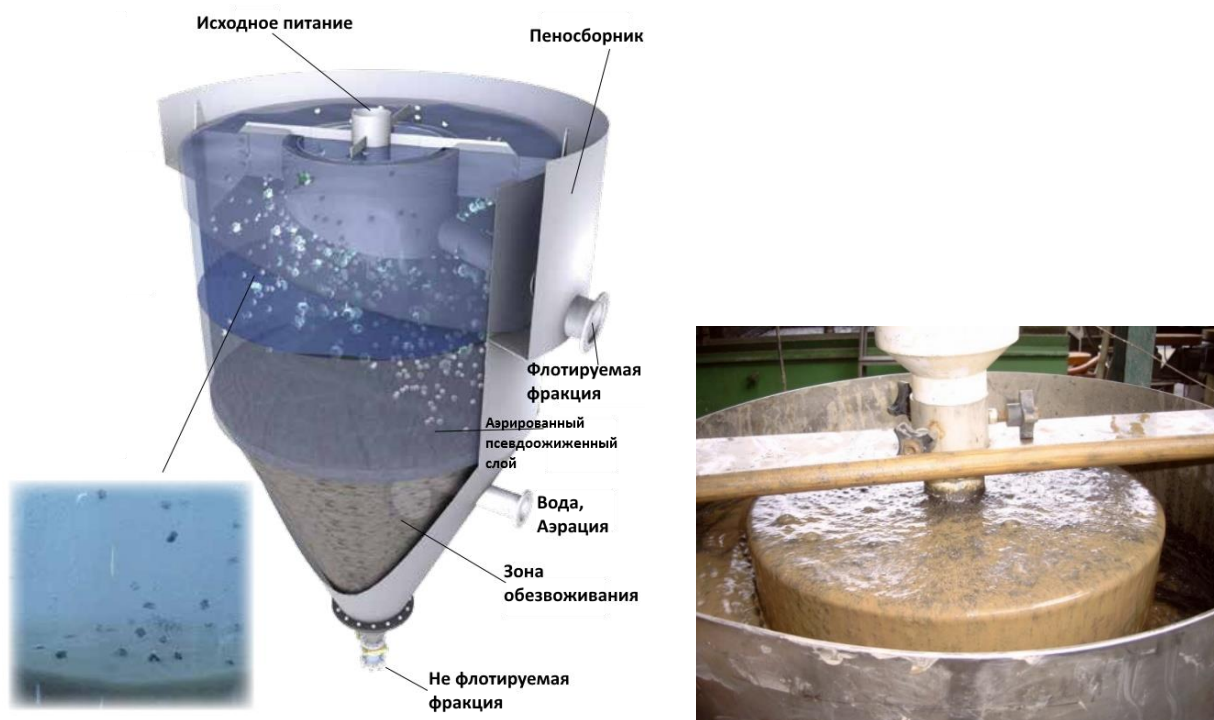


Рисунок 24 — Схема и общий вид гидрофлот-сепаратора

В мире установлено более 50 единиц машин данного типа, оборудование прошло промышленные испытания, и используется для обогащения угля, железных, калийных, различных сульфидных руд.

Преимущества использования гидрофлот-сепаратора в процессе обогащения минерального сырья:

- отсутствие движущихся частей в конструкции сепаратора;
- возможность извлекать методом флотации частицы крупностью больше 1 мм;
- высокая скорость флотации, оборудование можно использовать в режиме Флеш флотации (цикл измельчения) и для контрольной флотации хвостов;
- извлечение крупных частиц на ранней стадии обогащения позволяет избежать переизмельчения материала, снизить нагрузку на весь узел измельчения и, как следствие, повысить его производительность без замены размольного оборудования.

#### *Флотационные технологии для обогащения тонких классов угля*

Для обогащения тонких угольных шламов крупностью 0–0,25 мм наиболее пригоден процесс флотации.

Наибольшее распространение в мире получили колонные флотомшины «CoalPro» компании СРТ (Канада) (рисунок 25, А). За последние десять лет было установлено около семидесяти флотоколонн в Северной Америке, Австралии, России и Украине. Флотационные колонны на угольное применение имеют диаметр от 3 до 4,2 м и высоту до 8 м. Большинство установленных на фабриках флотоколонн используются для флотации угля крупностью 0–0,15 мм [102].



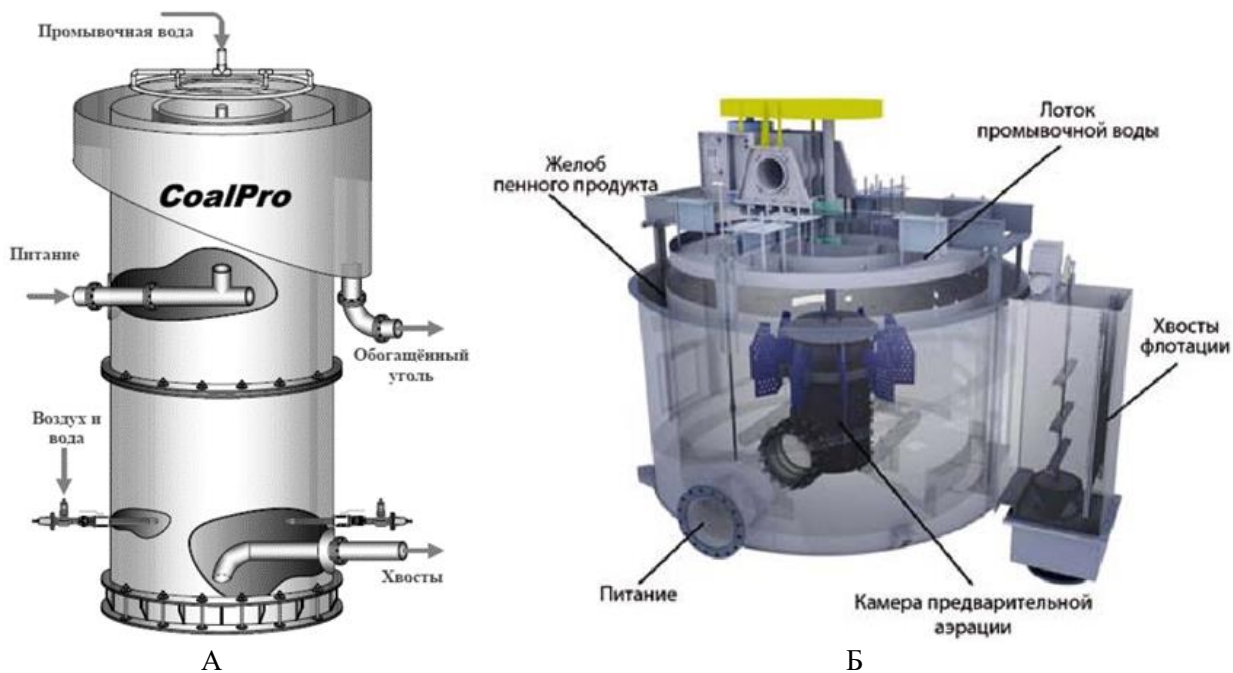


Рисунок 25 — Колонные флотомашин «CoalPro» (А) и StackCell» (Б)

Компанией Eriez и СРТ (Канада) разработана флотомашин «StackCell» для обогащения угольного шлама (рисунок 25, Б), использующая новую систему диспергации воздуха SlamJet и систему аэрации **флотационной пульпы CavTube** [103]. Использование данных систем позволяет увеличить выход концентрата флотации на 15 %, снизить расход пенообразователя на 10 %, расхода собирателя — на 50 %.

Новая технология флотации «StackCell» прошла промышленные испытания и уже применяется на обогатительных фабриках США. Использование высокоэффективного контактора в питании флотомашин позволяет сократить время флотации и уменьшить высоту флотационного отделения.

В новой флотомашине «StackCell» обеспечивается эффективный подвод энергии, используемой для генерации пузырьков и интенсивного контакта с частицами. Благодаря более интенсивной агитации пульпы, время флотации значительно уменьшается и составляет секунды, а не минуты, как в колонной флотомашине.

Высокая эффективность, небольшие размеры и масса, а также низкая стоимость новых флотомашин позволяет применять их при реконструкции действующих обогатительных фабрик.

### **Перспективные флотационные реагенты**

В России, как и за рубежом, разрабатываются и испытываются новые высокоэффективные экологически безопасные реагенты-собиратели и модификаторы для обогащения минерального сырья сложного состава, повышения извлечения ценных компонентов и снижения их потерь с отвальными продуктами.

### *Класс реагентов-собирателей из группы нитрилов*

В компании «Nouryon» («Ноурион») (ранее «AkzoNobel») были разработаны реагенты собиратели марки Текфлот (Tecflote) [104] — это группа инновационных запатентованных собирателей для флотации сульфидных руд, содержащих Cu, Zn, Pb, Mo, Ni, Au, Ag. Текфлот — собиратель на основе нитрила ( $-C\equiv N$ ) и имеет ряд уникальных характеристик в отличие от традиционных собирателей, а именно:

- значительно более высокая эффективность (селективность и извлечение) для Au и Ag по сравнению с применяемыми в настоящее время тиольными собирателями (РАХ), поскольку нитрилы имеют сродство с золотом и элементами платиновой группы. В ходе лабораторных испытаний доказано, что применение Текфлота позволяет повысить извлечение Au в основной флотации на 4 %;

- селективность в отношении пирита (пирит остается в хвостах флотации) при естественном рН без добавления извести;

- наблюдается высокая эффективность при флотации меди, молибдена и цинка;

- возможность применения в смеси с другими реагентами для флотации различных типов руд;

- химически устойчив при нормальных условиях;

- практически нерастворим в воде (труднорастворим,  $C < 1,5$  мкг/л (частиц на млрд) — ниже предела обнаружения) [104];

- реагент можно растворить в ацетонитриле (10 % ацетонитрил, 90 % Текфлот). Не рекомендуется применять другие растворители, так как они могут препятствовать селективному действию реагента.

### *Фосфорсодержащие реагенты*

В настоящее время перспективными собирателями для флотации руд редких металлов, олова и других перерабатываемых руд являются собиратели на основе фосфорных соединений.

За последние десятилетия отечественной промышленностью освоено производство фосфорорганических соединений — алкилфенилполиоксиэтиленгликолевых эфиров фосфорных кислот. Они нашли широкое применение в различных отраслях промышленности.

На их основе разработаны способы флотации целого ряда руд редких металлов, олова, флюорита и золота [105–107].

Целесообразно развивать это направление с целью создания эффективных технологий с использованием флотации для переработки различных видов отечественного минерального сырья.

Модифицированные диэтилдитиокарбамат (ДЭДТКм) и диизобутилдитиофосфинат (ДИФм), производные пиразолона ДАМ и ДТМ показали эффективность их применения для повышения извлечения Au из упорных руд за счет образования малорастворимых в воде соединений с Au и избирательной адсорбции на Au-сульфидах, обеспечивая селективность действия по сравнению с традиционным бутиловым ксантогенатом.

Применение неионогенного компонента ОПДТК в составе ДЭДТКм в сочетании с ксантогенатом и растительным депрессором позволило повысить селективность разделения золотосодержащих пирита и арсенопирита и снизить содержание мышьяка в пиритном концентрате [108]. Тестовые испытания на золотосодержащих рудах позволили экспериментально подтвердить эффективность применения новых реагентов с получением экономического эффекта от их внедрения. На примере руды Олимпиадинского месторождения показана возможность повышения извлечения Au на 7–10 % при повышении качества концентрата по Au на 3–8 г/т [109].

Предложен новый класс флотационных реагентов — термочувствительных полимеров (ТПП) с функциональными группами на золото для флокуляции и флотации шламовых фракций благородных металлов [109, 110]. Установлен эффект селективной флокуляции золотосодержащих сульфидов за счет избирательной адсорбции ТПП на золоте.

*Гуматы — экологически безопасные реагенты природного происхождения*

Источником для получения гуматных реагентов является окисленный бурый уголь. Навески угля при комнатной температуре перемешивают с растворами экстрагентов (гидроксид натрия) в течение 2 часов и фильтруют. Фильтраты представляют собой темно-коричневые растворы без запаха и являются готовыми реагентами для флотационных опытов; устойчивы при хранении в течение длительного времени.

Данные реагенты имеют природное происхождение, экологически безопасны, дешевы и используются с применением небольших дозировок, что делает их применение весьма эффективным. Применение разработанных новых гуматных реагентов в качестве депрессора пустой породы в операции коллективной флотации шихты богатых, медистых, вкрапленных руд на уже существующих предприятиях и при разработке технологий обогащения на объектах нераспределенного фонда позволит снизить потери меди на 1,2 % и никеля на 1,4 % с хвостами флотации в сравнении с базовым режимом [111–113].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.metso.com/siteassets/industry-pages/old-mining-industry-pages/comminution/crushing/superior-mkiii-primary-gyratory-brochure.pdf> Primary gyratory crushers by company «Metso Minerals» (Дата обращения: 14.04.2020 г.).
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/crushing-and-sizing/gyratory-crusher-nt> Gyratory crusher model NT by company «FLSmidth» (Дата обращения: 14.04.2020 г.).
3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/crushing-and-sizing/gyratory-crusher-ts> Gyratory crusher model TS by company «FLSmidth» (Дата обращения: 14.04.2020 г.).
4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/products-and-services/mineral-processing/crushers/gyratory-crushers> Design characteristics of gyratory crusher by company «KRUPP» (Дата обращения: 15.04.2020 г.).
5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mining-media.ru/ru/article/drobilka/1952-giratsionnye-drobilki-krupp> Гирационные дробилки фирмы «KRUPP» (Дата обращения: 15.04.2020 г.).
6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rocktechnology.sandvik/globalassets/products/stationary-crushers-and-screens/pdf/cg800i-brochure-english.pdf> The new CG800i connected gyratory crushers by company Sandvik (Дата обращения: 15.04.2020 г.).
7. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hybmachinery.com/index.php/Index/productdetail/id/10/tid/3> Technical data of gyratory crushers by company Shenyang Huayue Brilliant Machinery&Equipment Co. Ltd (Дата обращения: 16.04.2020 г.).
8. Barry A. Wills, James A. Finch. **Crushers**: Gyratory and Cone Crusher // Mineral Processing Design and Operations (Second Edition). 2016. — P. 153–168.
9. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.911metallurgist.com/blog/gyratory-crusher> Gyratory crusher working principle and animation (Дата обращения: 09.04.2020 г.).
10. Степаненко А.И., Степаненко А.А. Шнекозубчатые дробилки. Возможности и перспективы применения // «ИКСОБА» — 2013 г.: Сборник научных статей / Красноярск: Версо, 2013. — С. 915–920.
11. Степаненко А.И., Степаненко А.А. Перспективы применения шнекозубчатых дробилок в процессах рудоподготовки глиносодержащего сырья / Материалы научно-технической конференции, проводимой в рамках V Уральского горнопромышленного форума «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья» / под ред. Е.Ф. Цыпина. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. С. 238–243.
12. [Электронный ресурс]. Валковая шнекозубчатая дробилка (типа SIZER) компании Hazermag Режим доступа: <http://www.hazermag.com/ru/produkcija/valkovaja-shneko-zubchataja-drobilka-centralnogo-droblenija-tipa-sizer-hcs/> Дата обращения: 13.05.2019.

13. [Электронный ресурс]. Energy-efficient. Continuous-flow crushing. Grainsize-selective. Режим доступа: [http://www.hazemag.com/fileadmin/user\\_upload/hazemag/pdf/Broschuere\\_engl/Minerals/170920\\_hazemag\\_hcs\\_en\\_dd\\_low.pdf](http://www.hazemag.com/fileadmin/user_upload/hazemag/pdf/Broschuere_engl/Minerals/170920_hazemag_hcs_en_dd_low.pdf).

14. Бауман А.В. Проблемные вопросы проектирования и оптимизации схем сгущения. Интенсификация гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сырья. Технологии и оборудование // Материалы научно-практической конференции. Санкт-Петербург. – СПбГТИ (ТУ). 2018 — С. 214–217.

15. Степаненко А.И., Мальков С.М. Физическое моделирование в проектировании шнекозубчатых дробилок // Обогащение руд. 2018. № 3. С. 2–13.

16. [Электронный ресурс]. Оборудование для рудоподготовки компании Osborn Режим доступа: <https://osborn.co.za/product-category/hard-rock-processing/> Дата обращения: 13.05.2019.

17. [Электронный ресурс]. Дробильное оборудование Новокраматорского машиностроительного завода Режим доступа: [http://nkmz.com/fileadmin/data/prospekts/NKMZ\\_crushing\\_web.pdf](http://nkmz.com/fileadmin/data/prospekts/NKMZ_crushing_web.pdf) Дата обращения: 13.05.2019.

18. Степаненко А.И., Степаненко А.А., Мальков С.М. Особенности и практика процессов рудоподготовки липких и вязкопластичных руд // Золотодобыча, № 3(244), 2019 — С. 18–23.

19. Степаненко А.И. Критерии применимости процесса дробления в проектировании шнекозубчатых дробилок. // XII Конгресс обогатителей стран СНГ. Сборник материалов. — М.: ИТЕП, 2019 — С. 209–215.

20. [Электронный ресурс]. MAG'Impact. The high-performance impactor: cubicity and simplicity. Режим доступа: [http://www.scpm-international-concassage.com/pdf/mag/MAGOTTEAUX\\_MAG\\_2400.pdf](http://www.scpm-international-concassage.com/pdf/mag/MAGOTTEAUX_MAG_2400.pdf) Дата обращения: 22.05.2019.

21. [Электронный ресурс]. Rotating Vertical Impact Crusher. Режим доступа: <https://www.devesting.be/products/pf-impact-crusher.html> Дата обращения: 22.05.2019.

22. [Электронный ресурс]. MDM. Chine Large Capacity VSI Mobile Vertical Shaft Impact Crusher. Режим доступа: <http://www.dmcruising.com/sand-making-machine/large-capacity-vsi-mobile-vertical-shaft.html> Дата обращения: 24.05.2019.

23. [Электронный ресурс]. Stationary HSI impact crushers. Sandvik. Режим доступа: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/stationary-crushers-and-screens/stationary-hsi-impact-crushers/> Дата обращения: 24.05.2019.

24. [Электронный ресурс]. Zenith Minerals. B Series Deep Rotor Vertical Shaft Impact Crusher. Режим доступа: <https://www.zenithcrusher.com/products/crushing/b-series-deep-rotor-vertical-crusher.html> Дата обращения: 27.05.2019.

25. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г.А. Кардашев. — М.: Химия, 1990. — 205 с.

26. Логвиненко Д.Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д.Д. Логвиненко, О.П. Шеляков. — К.: Техника, 1976. — 144 с.

27. Мищенко М.В. Активация технологических процессов обработки материалов в аппаратах с вращающимся электромагнитным полем / М.В. Мищенко, М.М. Боков, М.Е. Гришаев // *Фундаментальные исследования*. — 2015. — № 2 (часть 16). — С. 3508–3512.

28. Хохряков О.В., Морозов Н.М., Хозин В.Г. Сравнительная оценка мельниц по размолоспособности кварцевого песка и его эффективности в цементных бетонах // *Известия КГАСУ*, 2011. — № 1. — С. 177–181.

29. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования / А.С. Тимонин: Справочник. Т. 2. — Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. — 1028 с.

30. Вершинин И.Н. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем / И.Н. Вершинин, Н.П. Вершинин. — Сальск, 2007. — 368 с.

31. Никитенко М.И. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов в аппаратах с вихревым слоем: дис. канд. техн. наук: 05.23.04 / Никитенко М.И.; Полтавский НИИКТИ эмалированного химического оборудования, Полтавский технический ун-т. — Полтава, 1996. — 190 с.

32. Дискантов А.К., Лазарева Т.Л. Ресурсосберегающая технология бетона с использованием метода механоактивации вяжущего // В сборнике: *Материалы секционных заседаний 54-й студенческой научно-технической конференции ТОГУ*, 2014. — С. 237–238.

33. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://globecore.com/products/chemical-mixing-machine-avs-150/> Electromagnetic ultrafine mill AVS-150 by company «GlobeCore». (Дата обращения: 11.03.2020 г.).

34. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://apparat-nn.ru/produksiya/oborudovanie/apparat-vikhrevogo-sloya-s-vodyanoj-sistemoj-okhlazhdeniya> Аппарат вихревого слоя с водяным охлаждением фирмы ООО «АППАРАТ-НН» (Дата обращения: 12.03.2020 г.).

35. Вилкул Ю.Г., Губин Г.В. Современные высокоэффективные методы измельчения руды в слое и их влияние на топологию традиционных технологических схем // *Вестник национальной академии горных наук. Республика Казахстан, Астана*, 2017. — № 1(1) — С. 85–92.

36. Thermo Scientific PSM-400MPX Particle Size Monitor for Mineral Slurries. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/Specification-Sheets/D10651~.pdf>.

37. CEOPS — CEMTEC ONLINE PARTICLE SIZE MEASUREMENT SYSTEM for wet and dry grinding and processing plants. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cemtec.at/en/products/ceops/>.

38. Advanced on-line slurry particle size analyzer — Essential view to process operation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.outotec.ru/globalassets/products/analyzers-and-automation/ote\\_psi500i\\_particle\\_size\\_analyzer\\_eng.pdf](https://www.outotec.ru/globalassets/products/analyzers-and-automation/ote_psi500i_particle_size_analyzer_eng.pdf).

39. [Электронный ресурс]. Режим доступа: Tomra Sorting mining secures major contract for Ma'aden's Saudi Arabia phosphate project <https://www.tomra.com/en/sorting/mining/mining-news/2015/business-win-maaden> (Дата обращения: 14.10.2020 г.).

40. [Электронный ресурс]. Режим доступа: Предварительное обогащение твердого минерального сырья с использованием радиометрических методов сепарации TOMRA Sorting. Материалы конференции «Mining World Russia 2019», Апрель 2019, Москва.

41. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining—Past, Present and Future. Christopher Robben, Hermann Wotruba. Minerals, 2019.

42. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://im-mining.com/2019/02/21/anglo-american-potential-bulk-sorting-technology/> Daniel Gleeson. Anglo American on the potential of bulk sorting technology. (Дата обращения: 01.08.2020 г.).

43. [Электронный ресурс]. Режим доступа: Ixtaca gold-silver deposit <https://almadenminerals.com/ixtaca/metallurgy/> (Дата обращения: 06.04.2020 г.)

44. Обогащение магнезита Саткинского месторождения рентгенодифракционным методом. Л.М. Аксельрод, М.Ю. Турчин, М.И. Назмиев, Е.В. Мануйлова, И.И. Галиханов. Сырьевые материалы. № 6, 2016 г., с 8–12.

45. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elementos.com.au/wp/wp-content/uploads/2019/08/02131160.pdf> Ore sorting performance testing delivers positive results at Oropesa, published by company Elementos Limited, 07 August 2019 (Дата обращения: 06.04.2020 г.).

46. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://newsroom.tomra.com/tomras-xrt-sorting-of-lumpy-chrome-ore-delivers-high-recovery-rates-and-cuts-costs/> Tomra's XRT sorting of lumpy chrome ore delivers high recovery rates and cuts costs, published by Tomra Sorting GmbH, 05 March 2020 (Дата обращения 07.04.2020 г.).

47. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tomra.com/en/sorting/mining/case-studies/gamma-llp> Gamma LLP, Kazakhstan, published by Tomra Sorting GmbH, 12 November 2019 (Дата обращения 09.04.2020 г.).

48. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.thehedgelesshorseman.com/pilbara/the-curse-of-karratha-also-its-greatest-strength/> “The Curse of Karratha”: Also its Greatest Strength?, published by The Hedgeless Horseman (Дата обращения 13.04.2020 г.).

49. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tomra.com/en-gb/sorting/mining/case-studies/mikroman-maden> Mikroman maden, Turkey, published by Tomra Sorting GmbH, 10 May 2019 (Дата обращения 09.04.2020 г.)

50. Юн А.Б. «Разработка и обоснование параметров горнотехнической системы комплексного освоения Жезказганского месторождения в условиях восполнения выбывающих мощностей рудников», диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Республика Казахстан, г. Караганда Научно-исследовательский центр инновационных технологий ТОО «КазГидроМедь», 2016.

51. [Электронный ресурс]. Режим доступа: Sort the yellow-brown from the gray. Sabina Szewczyk <https://www.mpo.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/surovinova-politika/vyzvy-seminare-a-informace-ze-sveta-nerostnych-surovin/2018/1/Sort-the-yellow-brown-from-the-gray.pdf> (Дата обращения: 14.10.2020 г.).
52. Bamber A.S. Integrated mining, pre-concentration and waste disposal systems for the increased sustainability of hard rock metal mining: PhD Thesis. University of British Columbia, Vancouver: 2008. — 331 p.
53. Режим доступа: Van Ketelhodt L., Bartram K. New developments in sensor-based sorting. //Recent advances in mineral processing plant design. — Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc., 2009. pp. 476–489.
54. Режим доступа: Beta Hunt Project <https://www.oresorting.com.au/projects> (Дата обращения: 14.10.2020 г.).
55. Режим доступа: Sorting out low-grade nickel ores. Guy Richards <http://www.iom3.org/news/sorting-out-low-grade-nickel-ores?c=574> (Дата обращения: 14.10.2020 г.).
56. Режим доступа: Предварительное обогащение твердого минерального сырья с использованием радиометрических методов сепарации TOMRA Sorting. Материалы конференции «Mining World Russia 2019», Апрель 2019, Москва (Дата обращения: 14.10.2020 г.).
57. Достижения угольщиков Приморья // Уголь. — 2011. — № 8. — С. 26–28.
58. Новак В.И. Обогащение разубоженной массы угля // Уголь Украины. — 2013. Март — С. 50–52.
59. Новак В.И., Пикалов М.Ф. Как выгодно обогащать энергетические угли. Технология allair // Добывающая промышленность. — 2018. — № 3. — С. 118–119.
60. Степаненко А.И. «Сухое» обогащение — реальная замена устаревшим технологиям // Энергетика и промышленность России / № 11(103) июнь 2008 г.: Энергетика и уголь — С 53.
61. Степаненко А.И., Комплекс пневматической сепарации «Сепайр®». Инновации в сухом обогащении руд и нерудных материалов // Золотодобыча, № 133, Декабрь, 2009 г.
62. Инновации в сухом обогащении угля, руд и нерудных материалов. Комплекс пневматической сепарации «СЕПАИР» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.gmexp.ru/netcat\\_files/multifile/2382/9.pdf](http://www.gmexp.ru/netcat_files/multifile/2382/9.pdf).
63. Stepanenko A.I. «Sepair» Pneumatic Separation Complex For Dry Coal Beneficiation. XVIII International Coal Preparation Congress/ Switzerland, 2016, pp. 1089–1094.
64. Степаненко А.И. Оборудование и технологии для обогащения некондиционного сырья // X Конгресс обогатителей стран СНГ: Сборник материалов. Том II / М: МИСиС, 2015. — С. 610–614.
65. «Сепайр» технология и аппараты пневмосепарации руд и нерудных материалов. 2018 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://gmexp.ru/netcat\\_files/multifile/2382/Broshyura\\_Sepair\\_2018\\_kor.pdf](http://gmexp.ru/netcat_files/multifile/2382/Broshyura_Sepair_2018_kor.pdf).



66. Степаненко А.И. Способ пневматического обогащения минерального сырья: Евразийский патент № 022959, опублик. и выдан: 31.03.2016.

67. Степаненко А.И. «Сепайр» — Новая технология разделения руд и нерудных материалов по плотности // VIII Конгресс обогатителей стран СНГ: Сборник материалов. Том 1 / М: МИСиС, 2011 г. — С. 175–179.

68. Степаненко А.И., Степаненко А.А., Мильшин О.Н., Ордон С.Ф. и др. Обогащение не кондиционных бокситов методом пневмосепарации // Сборник докладов десятого Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». — Красноярск: 2018 г. — С. 48–54.

69. Степаненко А.И., Степаненко А.А. Практические результаты пневмосепарации руд и нерудных материалов по технологии «Сепайр» // XII Конгресс обогатителей стран СНГ: Сборник материалов / М: ИТЕП, 2019 г. — С. 247–253.

70. Gravity based dry processing of turkish lignites: pilot scale allair jig application, Boylu F., Karakaş F., Güven O., Karağaçlıoğlu I., S.Çelik M., Fakültesi M. et al., Kömür Kongresi, Zonguldak / TÜRKİYE, 21 Mayıs 2014, P. 205–216.

71. Breuer, H., Hees, A. and Oezdemir, H., 2015, “Dry Jigging of Coal“, South Africa Coal Preparation Society (SACPS).

72. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://dovemining.com/dry-concentrators/#>

73. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

[http://zolteh.ru/technology\\_equipment/gravitatsionnyj-tsentrobezhyj-kontsentrator-novogo-tipa/](http://zolteh.ru/technology_equipment/gravitatsionnyj-tsentrobezhyj-kontsentrator-novogo-tipa/)

74. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.saltercyclones.com/products-services/laboratory-mineral-separator/>

75. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.saltercyclones.com/products-services/multi-gravity-separators/>

76. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://www.rudgormash.ru/?rec=64068899&mcat=1353>

77. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://www.rudgormash.ru/?rec=64068899&mcat=1353>

78. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

[http://karelskyokatysh.severstal.com/rus/press\\_center/news/document3522.html](http://karelskyokatysh.severstal.com/rus/press_center/news/document3522.html)

79. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.hibiny.com/news/archive/190693/>

80. Wet drum separator for reclaiming magnetic particles. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ife-bulk.com/en/magnetic-technology/wet-drum-separator.html>. Дата обращения: 23.05.2019.

81. Magnetic technology. IFE Aufbereitungstechnik GmbH / Pdf-file /Austria. 12 p. — 2019.

82. Wet drum separators for automatic, continuous recovery of magnetite or ferrosilicon in heavy media operations and concentration of ferrous and weakly magnetic ores. [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.eriez.com/Documents/Literature/Brochures/Products/Magnetic-Separation/MMPB-470-Eriez-Wet-Drum-Separator.pdf>. Дата обращения: 28.05.2019.

83. Twin-pole Drum Type Magnetic Separator TRMX type. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nmi-jpn.com/en/>. Дата обращения: 28.05.2019.

84. Separate magnetic, fine-grained particles in a wet medium — using STEINERT wet drum magnetic separators. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://steinertglobal.com/magnets-sensor-sorting-units/magnetic-separation/wet-drum-magnetic-separators/>. Дата обращения: 28.05.2019.

85. Wet drums for heavy media and concentration duty. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.eriez.com/NA/EN/Products/Magnetic-Separation/Permanent-Magnets/Wet-Drum-Separators.htm>. Дата обращения: 28.05.2019.

86. Анализ мирового опыта и исследования НТЦ МГГУ по извлечению мелкого золота при обработке рассыпных и прибрежных районов золотосодержащих месторождений, включая техногенные / В.В. Кармазин, В.А. Измалков, М.М. Раджабов (МГГУ). (<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-mirovogo-opyta-i-issledovaniya-ntts-mgggu-po-izvlecheniyu-melkogo-tonkogo-zolota-pri-otrabotke-rossypnyh-i-pribrezhnyh-rayonov/viewer>).

87. Красногоров В.О. Новые разработки НПО «ЭРГА» в области магнитного и электрического обогащения / Материалы международной научно-практической конференции «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья». 2019. С. 369–372.

88. Применение сверхпроводниковых технологий для повышения эффективности переработки минерального сырья / Д.Н. Диев, В.М. Лепехин, М.Н. Макаренко, М.И. Сурин, Д.И. Шутова // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): Материалы Международного совещания. Иркутск. 2019. С. 225

89. Афанасенко С.И., Лазариди А.Н. Современные системы магнитной сепарации ООО «ИТОМАК» / Научные основы и практика переработки руд и технологии сырья / материалы XXII Международной научно-технической конференции, 2017. С. 57–60.

90. Новые подходы в технологии получения магнитных жидкостей и магнитно-реологических суспензий технического назначения / Ф.С. Байбуртский, Ю.П. Пятибратов, Н.П. Глухоедов, Г.В. Степанов // Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН. <http://magneticliquid.narod.ru/authority/003.htm>).

91. Патент № 1781895. Способ регенерации магнитной жидкости / В.Н. Губаревич, Н.П. Ларионов, Т.В. Новиков, Н.Я. Максимова // Государственный проектно-конструкторский институт «Гипромашуглеобогащение». 1996 г.

92. Максимов Р.Н. Центробежно-вибрационный сепаратор на постоянных магнитах / Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (СКГМИ), г. Владикавказ, 2009 г.: (<https://cyberleninka.ru/article/n/tsentrobezno-vibratsionnyu-separator-na-postoyannyh-magnitah>).

93. Панышин А.М., Евдокимов С.И., Артемов С.В. Магнито-жидкостная сепарация золотосодержащих продуктов в вибрационном поле / Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (СКГМИ), г. Владикавказ ОАО «Электроцинк», г. Владикавказ // Цветная металлургия № 6, 2009 г.

94. Евдокимов В.С., Евдокимов С.И. Применение несмешивающихся разноплотных магнитных жидкостей в качестве среды разделения при магнито-жидкостной сепарации ООО «НПП ГЕОС», СКГМИ // Цветная металлургия № 2, 2017 г.

95. Гибридная флотация для обогащения полезных ископаемых. Primetals Technologies Ltd. Брошюра №: T01-0-N009-L2-P-V1-RU. Австрия, 2015. С 7.

96. Hybrid Flotation Technology. Tried, tested and true global R&D testing and optimization facilities of Primetals technologies and its cooperation partners. Metals&mining. Issue 1. 2016. P. 43.

97. Видуецкий М.Г., Мальцев В.А., Клячин В.В., Ручкин И.И., Читалов С.Л., Плеханов К.А., Топаев Г.Д., Шевелева Л.Д. Новая флотомашина колонного типа. («Известия высших учебных заведений») // Горный журнал. — 2001. — № 4–5. — С. 126–133

98. Видуецкий М.Г., Гарифулин И.Ф., Йочев И.Щ., Мальцев В.А., Пургин А.П. Опыт и перспективы использования флотомашин серии КФМ на предприятиях республики Болгария. Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): Материалы Международного совещания. Иркутск, 2019 г. С. 208–213.

99. Злобин М.Н. Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд // Горный журнал. — 2011. — № 1. — С. 87–89.

100. Miller J.D., Lin C.L., Wang Y., Mankosa M.J., Kohmuench J.N., Luttrell G.H. Significance of exposed grain surface area in coarse particle flotation of low-grade gold ore with the Gidrofloat technology. 28 International Mineral Processing Congress (IMPC), Quebec, Canada, sept. 11–15, 2016.

101. Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Флотационное извлечение минерального сырья повышенной крупности. Информация в современном мире. Материалы Международной конференции, посвященной 65-летию ВИНТИ РАН. 2017. — С. 148–150.

102. Козлов В.А., Пикалов М.Ф. Существующие флотационные технологии для обогащения угольного шлама. Уголь. 2014. № 2 (1055). С. 65–69.

103. Mankosa, M.J., Kohmuench, J.N., Christodoulou, L., and Yan, E.S., 2018. “Improving Fine Particle Flotation using the StackCell™ (Raising the Tail of the Elephant Curve),” Minerals Engineering, Vol 121, June 2018, pp. 83–89.

104. [Электронный ресурс]. Режим чтения: <https://www.nouryon.com/>  
Дата обращения 14.03.2019.

105. Курков А.В. Флотация как предмет супрамолекулярной химии — концептуальный подход / А.В. Курков // Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2010); Материалы международного совещания. М.: 2010. — С. 189–197.

106. Kurkov A.V., Sarychev G.A. Mechanism of action of flotation reagents in a non-sulfide flotation system based on the concepts of supramolecular chemistry. Proceedings of XXVI International Mineral Processing Congress, 2012. — P. 2612–2623.

107. Патент Ru № 2569394. Способ флотационного обогащения редкометаллической руды / А.В. Курков, А.В. Егоров, С.Н. Щербакова. М.: — 2015.

108. Пат. 2397025 РФ, МПК В 03 D 1/02, В 03 D. Способ разделения пирита и арсенопирита. / Чантурия В.А., Иванова Т.А., Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б.; опубл. 20.08.2010.

109. Chanturia V.A., Matveeva T.N., Ivanova T.A., Getman V.V. Mechanism of interaction of cloud point polymers with platinum and gold in flotation of finely disseminated precious metal ores // Mineral Processing and ExtrActive Metallurgy Review. 2016. Т. 37. № 3. С. 187–195.

110. Матвеева Т.Н., Иванова Т.А. Научное обоснование и перспективы применения новых реагентов для повышения извлечения золота из упорных руд. Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): Материалы Международного совещания. Иркутск, 2019 г. с. 30–34.

111. Анциферова С.А., Суворова О.Н. Активация сфалерита в условиях флотации сульфгидрильным собирателем и депрессии гуматным реагентом // Сб. докладов X Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». Красноярск: 2018. С. 1671–1676.

112. Маркосян С.М., Анциферова С.А., Тимошенко Л.И., Суворова О.Н. Флотационно-сорбционные свойства гуматного реагента по отношению к минералам железа в составе сульфидных руд цветных металлов // Сб. докладов X Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». Красноярск: 2018. — С. 1687–1691.

113. Усманова Н.Ф., Маркосян С.М., Тимошенко Л.И., Пасюга Д.В. Применение гуматного реагента в качестве депрессора при флотации медно-никелевых руд. Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): Материалы Международного совещания. Иркутск, 2019 г. С. 30–34.

Подписано в печать 03.11.2020 г.  
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 2,99  
Тираж 15 экз. Заказ № 16

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС.  
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31. Тел. (495) 9503570  
Отпечатано на ризографе в РИС ВИМС.