

УДК 622

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

***С.Ю. Лифановская (НИГТЦ ДВО РАН)***

*Рассматриваются перспективы развития обогатительных аппаратов, проводится их сравнительная оценка. Особое внимание уделяется проблемам, которые встречаются при разделении мелкозернистых и тонкоизмельченных руд.*

*The article reveals the future of ore-dressing apparatus development and gives their comparative evaluation. It outlines the problems, which arise during fine and finely ground ore separation.*

В последние годы в связи с истощением запасов богатых руд в промышленное освоение вовлекаются труднообогатимые руды новых месторождений с низким содержанием полезных компонентов и сложным вещественным составом. На сегодняшний день одной из важнейших

проблем в области гравитационного обогащения является разработка высокоэффективных аппаратов для разделения мелкозернистых и тонкоизмельченных руд, а также техногенных материалов. В России и за рубежом ведутся интенсивные работы в этом направлении, создано большое количество сепараторов различных конструкций, особенно центробежных. Однако в технической литературе редко встречаются какие-либо данные о сравнительных испытаниях такого рода обогатительных машин. Кроме того, проблема заключается в том, что россыпные месторождения благородных и редких металлов характеризуются большим количеством шламов. Ценные компоненты в этих месторождениях представлены широким диапазоном крупности минеральных частиц – от нескольких миллиметров до нескольких микрометров. Поэтому при использовании технологических схем с традиционными гравитационными аппаратами частицы ценных компонентов крупностью 0,25–0,15 мм улавливаются не полностью, а частицы крупностью менее 0,01 мм практически не извлекаются. Содержание частиц ценных компонентов крупностью менее 0,01 мм составляют 30–80% от их общей массы в рудах месторождения [2]. В последние годы повысился интерес к повторной переработке хвостов (горных отвалов), накопленных на золотоизвлекательных фабриках, проводятся исследования с целью разработки наиболее эффективной технологии извлечения золота из хвостов.

Повышение точности разделения минеральных частиц является основной задачей при создании обогатительных аппаратов, построении технологических схем, регулировании действующих обогатительных установок. Вся история развития обогатительной науки является историей поиска эффективных путей получения качественных концентратов полезных компонентов с минимальными потерями. Говоря об эффективности обогатительного процесса, обычно подразумевают целый комплекс показателей, включая экономические. Однако в основе высокоэффективного обогатительного передела лежит прежде всего физическая точность разделения составляющих минеральной смеси. Конечно же, нельзя забывать о важности таких вопросов, как рациональная рудоподготовка, экономика, экология процесса и т. д. В то же время появление новых обогатительных аппаратов и технологических решений, обеспечивающих повышение точности разделения при достаточной производительности, всегда оказывает решающее влияние на достижение более высокой эффективности обогатительного передела в целом.

Развитие техники и технологии гравитационных методов обогащения шло двумя основными путями:

- создание способов и аппаратов, обеспечивающих наиболее точное разделение минеральных зерен;
- разработка обогатительного оборудования большой единичной мощности.

В последнее время появился третий путь: создание способов и аппаратов, причиняющих минимальный экологический ущерб окружающей среде. За минувшее столетие благодаря трудам многих ученых создана развитая научная база гравитационного обогащения руд. Усилия исследователей и конструкторов были направлены на две важнейшие и взаимосвязанные проблемы: повышение точности разделения руд и материалов на составляющие их компоненты; увеличение производительности обогатительного оборудования. Прогресс в решении именно этих основных задач обеспечивал рост экономической эффективности, снижение капитальных и эксплуатационных затрат в обогатительных пределах, снижение расходов электроэнергии и свежей воды, улучшение экологической ситуации на горно-обогатительных предприятиях.

Работы в этом направлении велись в СССР с 1950-х гг. Были предложены десятки конструкций, которые делятся на напорные и безнапорные [6]. К напорным относятся различные типы гидроциклонов, из которых наиболее известны в нашей стране короткоконусные гидроциклоны, разработанные А.Г. Лопатиным.

В последние два десятилетия появилось большое количество различных центробежных обогатительных машин. Они позволяют при высокой производительности эффективно обогащать тонкоизмельченные материалы. В то же время многие теоретические аспекты разделения частиц в центробежных полях пока недостаточно проработаны, мало проведено сравнительных испытаний центробежных сепараторов. В технической литературе преимущественно приводятся результаты испытаний конкретных аппаратов на конкретных рудах без объективных оценок точности разделения. Это усложняет не только процесс разработки нового оборудования в этой области, но и затрудняет выбор аппаратов для использования в схемах обогащения, так как потребителю приходится ориентироваться исключительно на данные рекламного характера.

Несмотря на то что гравитационные методы широко используются для обогащения измельченных руд песков россыпей, содержащих различные ценные минералы, не существует точного математического описания гравитационных процессов. Современное состояние теории гравитационного обогащения не удовлетворяет запросам практики. В теории гравитационного обогащения главной моделью является модель взвешенного слоя, образованного восходящим потоком. В этой модели принято, что взвешенные частицы и слой в целом находятся в равновесии под действием гравитационных и гидродинамических сил. Практически во всех гравитационных аппаратах разделение частиц происходит во взвешенных разрыхленных слоях, т. е. в слоях, в которых твердые частицы находятся во взвешенном состоянии, обусловленном воздействием на них жидкости, газа или вибрирующих твердых стенок. Толщина взвешенных слоев колеблется от нескольких метров (сгустители, гидравлические классификаторы) до миллиметров (концентрационные столы, шлюзы).

В последние годы наблюдается существенный прогресс в области гравитационного обогащения, связанный с появлением большого количества центробежных сепараторов различных типов, из которых наибольшее распространение получили концентраторы «Knelson» и центробежные сепараторы «Falcon». В рекламных материалах встречаются утверждения о возможности успешного извлечения тяжелых минеральных частиц крупностью до единиц микрометра, однако некоторые источники, базируясь на опыте промышленной эксплуатации, утверждают, что граница эффективного использования этих концентраторов не опускается ниже 30 мкм.

Работа концентраторов «Knelson» не получила положительных отзывов. По результатам его эксплуатации [1] выяснилось, что после каждого часа работы этот аппарат необходимо останавливать для сполоска на 15–20 минут. В противном случае в рабочей части чаши аппарата накапливается критическая масса тяжелой фракции, которая сбрасывается аппаратом в отвал. Это осложняется еще и тем, что отсутствует возможность визуального наблюдения за ходом концентрации тяжелой фракции в чаше аппарата. Работа концентратора «Knelson» требует достаточно больших затрат электроэнергии и постоянного внимательного надзора. В довершение всего следует отметить потребность концентратора в чистой воде, так как на мутной технической воде его работа сопровождается постоянной забивкой и заиливанием перфорации конуса. Расход разрыхляющей воды для концентратора диаметром 760 мм и производительностью не более 45 т/ч доходит до 400 л/мин. Разгрузка концентратора периодическая, так что для имитации непрерывности процесса требуется как минимум два концентратора (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика концентраторов «Knelson»

Параметры	Модель концентратора			
	КС-CD12	КС-CD20	КС-CD30	КС-CD48
Мощность мотора, кВт	1,5	5,6	11,2	30
Вес, кг (приблизительно)	263	907	1455	5680
Питание по-твердому, т/ч	0–3,6	0–13,6	0–36,3	0–90,9
Питание по-жидкому, л/мин	0–190	0–454	0–1363	0–2270
Содержание твердого в пульпе, %	0–75	0–75	0–75	0–75
Максимальные размеры частиц, мм:				
коренные	1,7	1,7	1,7	1,7
россыпные	6,4	6,4	6,4	5,4
Потребление оживающей воды, л/мин	113–159	302–454	473–663	1136–1893
Длительность цикла концентрации, ч:				
коренные	2–6	2–6	2–6	2–6
россыпные	8–24	8–24	8–24	8–24
Длительность цикла очистки, мин	1–2	1–2	1–2	2–3
Объем концентрата, л	2,72	9,2	17,6	41
Вес концентрата, кг	4–7	14–18	27–36	90–100

В концентраторе «Falcon» предусмотрено предварительное расслоение пульпы на удлиненной гладкой конической части, после чего нижние слои постели попадают в кольцевые каналы, в которых разрыхление осевших частиц осуществляется таким же образом, что и концентраторе «Knelson», т. е. водой, подаваемой через многочисленные отверстия в дне каналов. В концентраторе «Falcon» количество улавливающих частиц меньше, чем в концентраторе «Knelson», но каналы глубже, скорость вращения чаши больше, что позволяет достигать уровня центростремительных ускорений до 300 м/с<sup>2</sup>, причем возможна регулировка этого параметра (табл. 2).

Характеристика центробежных сепараторов «Falcon»

Параметры	Модель сепаратора										
	C-10	C-20	C-40	B-6	B-12	B-20	SB-4	SB-12	SB-21	SB-38	
Производительность: по-твердому, т/ч по пульпе, м <sup>3</sup> /ч	4,5	22	180	0,4	5,5	22	0,25	4,5	18	55	
	17,1	57,0	454	3,5	22,8	57	2,3	18	45,6	135,2	
Расход разрыхляющей воды, м <sup>3</sup> /ч	–	–	–	–	–	–	1,1	9,0	18,0	79,5	
Масса аппарата, т	0,8	2,2	8,2	0,1	0,8	1,8	0,03	0,37	0,82	2,91	
Габариты, м:											
	длина	1,2	1,6	2,4	0,6	1,4	1,5	0,5	1,1	1,2	1,9
	ширина	1,2	1,6	2,4	0,5	0,9	1,4	0,3	0,8	1,2	1,9
высота	1,7	2,3	3,5	0,9	1,9	2,7	0,5	1,5	2,0	2,7	

Концентратор «Falcon» является одним из основных конкурентов концентратора «Knelson». Со- поставление точностей разделения на них различных руд и материалов представляет особый интерес.

По данным работ [1, 3], концентраторы «Knelson» и «Falcon» при обогащении мелких песков обеспечивают близкие показатели извлечения тяжелых компонентов. Но для работы «Falcon» требуется существенно большее количество воды, чем для «Knelson». Скорость вращения чаши у первого значительно выше, чем у второго, что может отрицательно сказываться на показателях надежности в процессе длительной эксплуатации. В то же время концентраторы «Falcon» дешевле концентраторов «Knelson».

Для доизвлечения ряда минеральных компонентов на фабриках часто используют гидроциклонные центробежные сепараторы. Опыт работы редкометалльных фабрик Китая показал целесообразность применения для рудного материала крупностью менее 0,074 мм безнапорных центробежных сепараторов. Английскими исследователями (Б. Чэн, Р. Мозли, Дж. Чайлдс) разработан промышленный аппарат для обогащения ультратонкого сырья, использующий эффект разделения, который возникает при вращении барабана со скоростью 150–300 об/мин и его вибрации вдоль своей оси. Такой аппарат позволяет разделять минералы, отличающиеся по плотности на 1 г/см<sup>2</sup>.

На зарубежных обогатительных фабриках все большее распространение получают конусные сепараторы Рейчерта, представляющие собой последовательное соединение в одном сепараторе конусов с общей вертикальной осью и суживающихся желобов. Для увеличения производительности конусы монтируются сдвоенными. Сепараторы Рейчерта рационально применять на начальных стадиях обогащения для получения грубого концентрата.

Большой интерес также представляет центробежный вибрационный концентратор (ВРК), разработанный ОАО «Грант» (г. Наро-Фоминск), и центробежный концентратор с плавающей постелью (ЦКПП) конструкции ОАО МНПО «Полиметалл» (г. Санкт-Петербург). У этих аппаратов разрыхление постели производится механическим путем: у первого – наложением высокочастотных планетарных колебаний, у второго – деформацией вращающейся полиуретановой чаши с нарифлением [3].

В Японии разработан способ и установка для классификации тонкодисперсного материала, представляющая собой пучок тонких параллельных трубок, вращаемых так, что возникающая центробежная сила меньше 1/10 силы тяжести. Разделение происходит в трубах под действием ламинарных потоков.

В последнее время появились способы и варианты конструкции устройств, в которых рекомендовано использовать для разделения тонкозернистых минеральных частиц нестационарное центробежное поле. В этом случае используется принцип разделения зерен как по плотности, так и по массе вследствие статического и динамического воздействия среды на зерна, движущиеся в этих условиях с различными скоростями. Отделение тонкодисперсных рудных частиц от остальной части минералов производится в установке для обогащения в нестационарном центробежном поле под влиянием центробежных и гравитационных сил.

Сравнения эффективности центробежных сепараторов со статическими аппаратами разного типа на примере россыпного золота сведены согласно данным различных исследователей [1, 3] в табл. 3, из которой видно, что показатели обогащения мелкого и тонкого золота (менее 0,25 мм) имеют большой разброс. На основании такого рода данных весьма трудно даже ориентировочно определить с выбором какого-либо аппарата.

Показатели извлечения золота различной крупности на некоторых гравитационных аппаратах

Используемые аппараты	Извлечение золота при крупности, мм					
	>1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	< 0,05
Шлюзы неподвижные	97–100	91–94	76–79	42–51	4–8	–
Отсадочные машины	99–100	97–98	91–93	69–76	45–50	15–20
Концентрационные столы	100	100	95–97	70–92	50–84	30–51
Гидроциклоны коротко-конусные	95–100	90–100	70–95	40–86	20–72	10–61
Вибрационные лотки	100	100	98–100	70–98	50–70	< 50
Центробежные сепараторы	100	99–100	95–97	80–95	71–91	67–84

По сравнению с гравитационной классификацией минеральных частиц использование центробежного поля позволяет резко снизить крупность разделения. Анализ исследовательских работ и практика работы обогатительных фабрик показывают, что при большем снижении крупности минеральных частиц необходимо уделить особое внимание разработке аппаратов и исследованию процессов обогащения в центробежных полях.

Приведенный обзор и анализ состояния проблемы повышения эффективности технологии обогащения тонкодисперсных материалов свидетельствуют о том, что до настоящего времени отсутствуют эффективные способы извлечения частиц крупностью менее 0,074 мм, что приводит к большим потерям ценного компонента со шламами, доходящими в некоторых случаях до 50%. Такое положение сложилось на действующих обогатительных предприятиях.

Необходимым условием при центробежно-гравитационном обогащении является наличие транспортного потока в направлении, не совпадающем с вектором силы центробежного поля. При отсутствии смывного потока, а также в том случае, если направление потока совпадает с направлением поля, расслоения материала по компонентам практически не происходит.

Немаловажное значение при разделении материалов имеет отношение жидкого к твердому, т. е. разжижение пульпы. При малом соотношении в пульпе жидкого к твердому ( $J : T$ ) разделение нарушается. Причинами этого являются возрастающая вязкость пульпы и высокая сплоченность ее зерен, препятствующая не только центробежному, но и сегрегационному расслоению материала. Аппараты работают эффективнее на сильноразбавленных пульпах [4].

Для решения данной проблемы среди множества направлений интенсификации технологии обогащения тонкодисперсных материалов как в отечественной, так и в зарубежной практике более интересным в теоретическом и практическом аспектах является метод применения вихревых аппаратов для разделения частиц в потоке по размерам и удельному весу [5]. Принцип их действия заключается в получении спектра частиц в закрученном потоке, который дезинтегрирует их по физическим свойствам. Это направление является новым в обогащении полезных ископаемых и может стать основой для решения проблемы разделения тонких классов минералов различных видов сырья.

Развитие данного научного направления является перспективным и может привести к созданию высокоэффективной технологии и производительных аппаратов, приемлемых для использования в горнорудной промышленности.

### Литература

1. Богданович А.В., Васильев А.М. Влияние вязкости воды на процесс гравитационного обогащения // Обогащение руд. – 2005. – № 4.
2. Быховер Н.А. Научно-технический прогресс и проблемы минерального сырья. – М.: Недра, 1979.
3. Захаров Б.А. Исследование, разработка и внедрение технологии гравитационного извлечения благородных металлов при обогащении вкрапленных медно-никелевых руд Норильского промышленного района: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004. – 156 с.
4. Кутепов А.М., Латкин А.С. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем. – М.: Наука, 1999. – 250 с.
5. Латкин А.С., Сажин Б.С., Инполитов Е.Г. Вихревые аппараты для реализации процессов химической технологии. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. – 130 с.
6. Лопатин А.Г. Центробежное обогащение руд и песков. – М.: Недра, 1987. – 224 с.