

А.С. КИРНАРСКИЙ, д-р техн. наук
(Германия, "Инжиниринг Доберсек ГмбХ"),

С.А. ЛУПЕЙ

(Украина, Иршанск, Иршанский горно-обогатительный комбинат)

УЛУЧШЕНИЕ СЕПАРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ОДНОФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ

Введение

Принцип однофункциональности сепарационных процессов [1] означает достижение максимальной эффективности разделения полезного и бесполезного компонентов обогащаемого минерального сырья при условии осуществления процесса по одному разделительному признаку, когда проявление других разделительных признаков исключается или пренебрежительно мало. Например, в условиях гравитационного обогащения имеет место разделение по крупности и плотности, при этом рационально проводить разделение по крупности при незначительном влиянии плотности зерен, а затем разделять их преимущественно по плотности, так как термодинамически любую систему легче привести в равновесие по одному рабочему параметру, чем по нескольким одновременно.

Для проверки изложенного принципа были проведены полупромышленные испытания по гравитационному обогащению каолинов одного из месторождений Иршанского рудного поля, в которых необходимо было произвести разделение полезной (ильменит) и бесполезной (сидерит) составляющей с применением технологически эффективного, экономически рентабельного и экологически чистого сепарационного процесса. Учитывая одинаковые парамагнитные свойства ильменита и сидерита, от применения магнитной сепарации отказались. Электросепарация в данном случае уместна, но сопряжена со значительными экономическими издержками. Флотация не только дорогой технологический процесс, но и имеет негативное влияние на окружающую природу. Единственный метод, который удовлетворял всем упомянутым требованиям, сводился к гравитационному обогащению данных песков, но соотношение плотностей ильменита ($4,50 \text{ т/м}^3$) и сидерита ($3,76 \text{ т/м}^3$), равного 1,2, свидетельствует о крайне трудной обогатимости такого минерального сырья, особенно в гравитационных полях малой интенсивности.

Для достижения необходимых технологических показателей прибегли к использованию принципа однофункциональности и подвергли исходный материал гравитационному обогащению узкими машинными классами, что позволило свести к минимуму воздействие крупности зерен на процесс их разделения по плотности и обеспечить заданную эффективность сепарации.

1. Объект исследований

Для проведения полупромышленных исследований на обогатимость в мае
Збагачення корисних копалин, 2011. – Вип. 45(86)

Гравітаційна сепарація

2010 года на одном из месторождений Иршанского рудного поля была отобрана валовая технологическая проба ильменитовых песков в количестве 4653,9 кг в пересчете на сырую массу. После проведения химических анализов представительных проб были получены вещественный и гранулометрический составы шлихов и ильменита, которые приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Вещественный состав исходных песков			
Минералы, оксиды	Содержание, %	Минералы, оксиды	Содержание, %
Ильменит	6,7	Магнетит	
Сидерит	4,4	Биотит	
Марказит ср.	зн	Углистые	
Марказит св.	0,1	Илы	47,8
Г/о железа	2,7	Кварц	13,0
Лейкоксен	зн		
Рутил			
Циркон	зн	TiO ₂ ест	4,71
Глауконит	зн	P ₂ O ₅	0,931
Апатит	0,6	Cr ₂ O ₃	0,011
Гранат		Fe общ	14,76
Хлорит	18,1	Fe ₂ O ₃	7,78
Полевой шпат	6,3	FeO	6,29
Каолинит	0,3	TiO ₂ очищ	50,28

Таблица 2

Гранулометрический состав исходных песков								
Классы крупности, мм	Выход, %		Содержание, %		Извлечение, %			
	частный	суммарный	ильменит	сидерит	ильменит		сидерит	
					частный	суммарный	частный	суммарный
+40,0	0,19	0,19	–	–	–	–	–	–
+20,0	0,14	0,33	–	–	–	–	–	–
+10,0	0,18	0,51	–	–	–	–	–	–
+4,0	1,30	1,81	–	–	–	–	–	–
+2,0	6,00	7,81	1,40	22,8	1,36	1,36	28,53	28,53
+1,0	5,39	13,20	1,72	9,09	1,50	2,86	10,22	38,75
+0,56	11,53	24,73	6,00	7,53	11,16	14,02	18,10	56,85
+0,28	12,07	36,80	17,52	6,81	34,11	48,13	17,14	73,99
+0,14	12,16	48,96	20,29	6,84	39,80	87,93	17,34	91,33
+0,10	4,86	53,82	14,45	7,98	11,33	99,26	8,09	99,42
-0,10	1,42	55,24	3,25	1,95	0,74	100,00	0,58	100,00
Илы	44,76	100,00	–	–	–	–	–	–
Итого:	100,00		6,20	4,80	100,00		100,00	

Из таблицы 1 видно, что исходные пески содержат 6,7% ильменита, 4,4% сидерита, 2,7% лимонита, а также 47,8% илистых шламов. Ильменит слабо изменен, содержание диоксида титана (TiO₂) в нем на уровне 50,28%. Плотность ильменита составляет 4,51 г/см³. Ильменит первичных каолинов на 96,40% рас-

пределен в классе крупности $-1,0+0,14$ мм, а сидерит более крупный и на 99,42% распределен в классе крупности $-4,0+0,10$ мм (табл. 2). Большинство зерен сидерита имеют окатанную, сферическую форму и представляют собой шаровидные сплошные образования, часто содержащие значительное количество глинистых включений. Сидерит представлен от 40,0% до 60,0% крупностью $+1,0$ мм, остальной – высокодисперсной фракцией – 0,1 мм. Кристаллы имеют неправильную, натечную, гроздевидную форму, при этом наблюдается много агрегатных зерен с ильменитом и кварцем. Цвет зерен от светло- до темно-коричневого. Содержание сидерита колеблется в пределах от 3,3 до 3,5%. Плотность сидерита равна $3,76$ г/см³.

2. Подготовка исходных песков к обогащению

Подготовка к обогащению включала в себя операцию отмывки каолинов в промывочной установке "Тайфун" с последующим грохочением отмытых песков по классу 3 мм. Подрешетный продукт крупностью – 3,0 мм подвергся четырехстадиальному обесшламливанию в гидроциклонах диаметром 50 мм. В результате промывки и обесшламливания первичных каолинов выход отмытых песков составил 30,27%, содержание ильменита – 19,7%, сидерита – 17,2%. Извлечение ильменита по узлу – 98,47% , сидерита – 92,95%.

Анализ работы узла обесшламливания показал, что операция второго контрольного обесшламливания малоэффективна. Эффективность операции по первичным каолинам составила 32,1% , по вторичным каолинам – 4,7%. Извлечение ильменита в пески операции составило от 0,60% , по первичным каолинам, до 0,29% , по вторичным каолинам. Содержание шламов в песках от 68,7% до 92,09%, соответственно, при выходе песков от 1,82 до 3,0%. Учитывая вышеизложенное, при расчете общей схемы переработки первичных и вторичных каолинов в узле подготовки песков к обогащению операция II контрольного обесшламливания не применялась.

Для дальнейшего исследования на обогатимось была составлена проба, которая содержала 7,1% ильменита, 5,5% сидерита и около 50,0% илов. Содержание диоксида титана (TiO_2) в ильмените – 54,72%. По гранулометрическому составу основная масса исходного материала, пригодного для дальнейшего гравитационного обогащения (38,05%), была тавлена крупностью $-1,0+0,10$ мм. Содержание илистых шламов крупностью – 0,044 мм равно 49,77%. 96,6% ильменита распределено в классе крупности $-1,0+0,10$ мм. Сидерит крупнее ильменита и на 99,37% распределен в классе $-4,0+0,10$ мм. Средний выход обесшламленных песков составил 29,67%. В таком подготовленном по крупности материале содержалось 23,1% ильменита, 17,3% сидерита, 1,9% лимонита, как в виде свободных зерен, так и в виде пленок на ильмените и сидерите. Извлечение ильменита в отмытые пески по узлу составило 96,53%, а сидерита – 93,55%. Потери ильменита со сливом контрольного обесшламливания – 2,92%. Слив контрольного обесшламливания содержит 97,37% шламов крупностью – 0,044 мм. Ильменит отмытых песков слабо изменен, содержание диоксида титана (TiO_2) в ильмените – 54,10%. Материал отмытых песков на 78,47% пред-

Гравітаційна сепарація

ставлен крупністю -1,0+0,10 мм, в цьому класі розподілено 98,35% ильменита і 76,29% сидерита.

3. Мокрая винтовая сепарация песков

Гравитационное обогащение отмытых песков осуществлялось на стенде винтового сепаратора типа СВ2-1000 по схеме, включающей основную, две промпродуктовые и две очистные мокрые винтовые сепарации. Основная мокрая винтовая сепарация позволяет получить черновой концентрат с содержанием ильменита 62,6% и сидерита – 15,2%. Выход черного концентрата от операции составил 31,5%, извлечение – 85,31%.

Схема гравитационного обогащения позволила получить коллективный гравитационный черновой концентрат, содержащий 60,1% ильменита, 16,6% сидерита, 3,2% апатита, 0,8% лимонита, 0,8% лейкоксена. Черновой концентрат характеризуется низким содержанием диоксида титана (TiO_2) в ильмените – 54,0% и высоким содержанием P_2O_5 – 1,30%. По гранулометрическому составу материал черного концентрата на 97,5% представлен крупностью – 1,0 мм в котором распределено 99,41% ильменита и 89,79% сидерита. Сквозной выход черного концентрата составил 10,99%, извлечение ильменита в концентрат – 93,02%, сидерита – 33,20%. Извлечение ильменита в черновой концентрат по гравитационному узлу – 96,36%. Эффективность схемы гравитационного обогащения составляет 77,2%.

4. Доводка коллективного концентрата на концентрационном столе

Для промышленной проверки принципа однофункциональности [1], согласно которому технологически эффективнее осуществлять разделение по одному из разделительных признаков, например, по плотности, при минимально возможном проявлении других разделительных признаков, в данном случае, крупности зерен, коллективный концентрат подвергался обогащению на концентрационном столе с предварительной классификацией исходного материала на классы и без нее. В первом случае имеет место разделение зерен по плотности при пониженном влиянии крупности зерен, в то время как во втором случае имеет место сепарация по двум разделительным признакам.

Сначала обогащение коллективного черного ильменитового концентрата осуществлялось одним машинным классом крупностью минус 1 мм. При таком питании концентрационного стола "Holman" имеет место значительное влияние крупности зерен на процесс разделения по их плотности, т.е. система приводится в равновесие по двум разделительным признакам. Результаты гравитационного обогащения широким машинным классом приведены на рис.1.

Из приведенных данных видно, что в результате обогащения без узкой классификации получен концентрат с содержанием ильменита 77,6% и его извлечения 31,25%, промпродукт при содержании ильменита 63,6% и его извлечения 50,28%.

Во втором случае черновой концентрат был подвергнут классификации по классам крупности 1,0 и 0,25 мм. Класс +1,0 мм, выход которого от операции

составил 2,55% является отвальным продуктом, содержал 23,5% ильменита и 69,3% сидерита.

Выход класса $-1,0+0,25$ мм составил 41,49% от операции, а выход класса $-0,25$ мм – 55,96%. В классе $-1,0+0,25$ мм содержалось 73,1% ильменита и 15,5% сидерита, в который извлеклось 46,92% ильменита и 12,85% сидерита. В классе $-0,25$ мм содержалось 52,1% ильменита и 15,0% сидерита; в этот класс извлекалось 45,17% ильменита и 16,82% сидерита.

Раздельное обогащение классов $-1,0+0,25$ мм и $-0,25$ мм на концентрационном столе "Holman" позволило получить, соответственно, с основных операций концентраты с содержанием ильменита 97,2%, сидерита 1,9 и 82,4% ильменита, сидерита 9,0%. Перечистки промпродуктов основных операций крупностью $-1,0+0,25$ мм и $-0,25$ мм позволили получить концентраты, содержащие 89,6% ильменита, 6,4% сидерита и 80,5% ильменита, 10,0% сидерита, соответственно.

Анализ работы узла доводки коллективного концентрата позволил выделить два концентрата и отвальные хвосты. Выход от головы схемы концентратов основной и промпродуктовой концентрации составил 2,09%, содержание ильменита в нем 87,7%, сидерита – 6,8%, извлечение ильменита в него – 25,81%, сидерита – 2,58%. Выход второго концентрата, представленного промпродуктами промпродуктовых операций составил 4,55%, содержание ильменита в нем 73,3%, сидерита – 11,5%, извлечение ильменита в концентрат составило 47,0%, сидерита – 9,49%. Потери ильменита с отвальными хвостами – 19,28%, сидерита – 17,60%.

Для снижения потерь ильменита с отвальными хвостами в узле доводки и повышения качества ильменитовых концентратов была проведена оттирка коллективного черного концентрата в промывочной установке "Тайфун". Время оттирки составило 15 минут, плотность питания – 70,0%. Выход слива после промывки оттертого концентрата составил от операции 7,55%, потери ильменита не превышали 2,0%.

Концентрат после оттирки был подвергнут более узкой классификации на классы крупностью $-1,0+0,25$, $-0,25+0,14$ и $-0,14+0,0$ мм с последующим их обогащением на концентрационном столе "Holman". В результате концентрации были получены два концентрата и отвальные хвосты. Выход первого концентрата составил 3,43%, содержание ильменита – 89,6%, сидерита – 6,3%, извлечение ильменита в концентрат – 43,27%. Выход второго концентрата составил 3,77%, содержание ильменита – 73,5%, сидерита – 12,6%; извлечение ильменита в концентрат – 39,04%. Потери ильменита с отвальными хвостами составили 7,98%.

Для сравнения результатов обогащения на концентрационном столе с другими гравитационными приборами были проведены опыты по обогащению классифицированных продуктов на винтовом сепараторе диаметром 700 мм. Результаты исследований сведены в табл. 3.

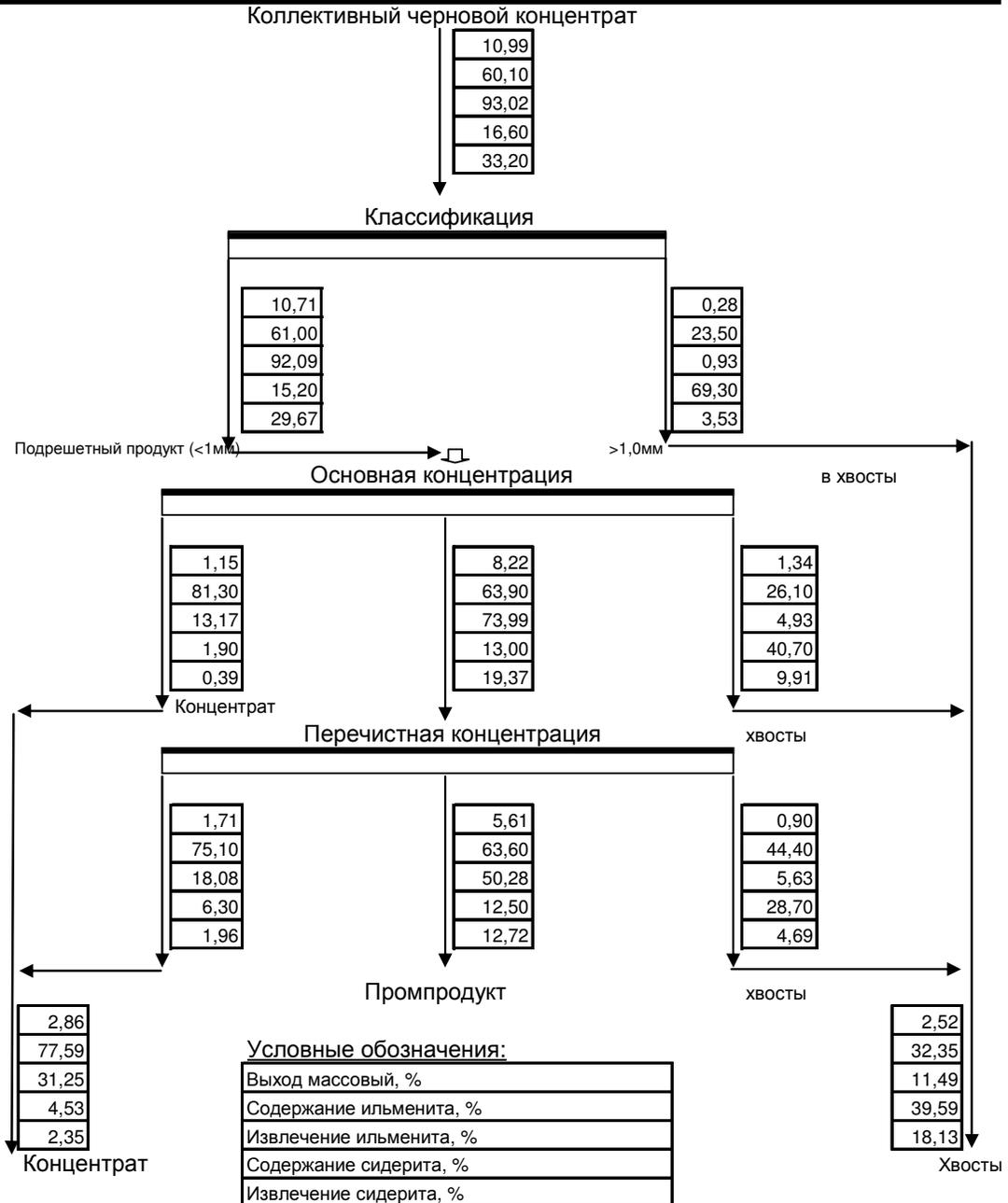
Гравітаційна сепарація

Таблиця 3

Сравнительные результаты обогащения классифицированных продуктов на концентрационном столе "Holman" и винтовом сепараторе диаметром 700 мм

Наименование продуктов	Выход, %	Массовая доля, %		Извлечение, %			
		ильменита	сидерита	ильменита		сидерита	
				част.	сумм.	част.	сумм.
Обогащение на винтовом сепараторе							
Питание: черновой к-т после оттирки кл. -0,25+0,14 мм	100,0	63,9	14,8	100,0		100,0	
Концентрат	42,96	85,1	8,4	57,18	57,18	24,35	24,35
Промпродукт	42,28	59,3	18,2	39,22	96,40	51,94	76,29
Хвосты	14,76	15,6	23,8	3,6	100,0	23,71	100,0
Обогащение на концентрационном столе "Holman"							
Питание: черновой к-т после оттирки кл. -0,25+0,14 мм	100,0	65,9	14,6	100,0		100,0	
Концентрат	20,8	93,1	3,7	26,18	26,18	5,3	5,3
Промпродукт	55,8	78,4	11,8	59,0	85,18	45,1	50,4
Хвосты	23,4	11,3	31,2	14,82	100,0	49,6	100,0
Обогащение на винтовом сепараторе							
Питание: черновой к-т после оттирки кл. -0,14 мм	100,0	48,8	19,0	100,0		100,0	
Концентрат	30,26	70,8	13,6	43,91	43,91	21,63	21,63
Промпродукт	44,32	51,2	21,6	46,51	90,42	50,31	71,94
Хвосты	25,42	18,4	21,0	9,58	100,0	28,06	100,0
Обогащение на концентрационном столе "Holman"							
Питание: черновой к-т после оттирки кл. -0,14 мм	100,0	53,2	18,1	100,0		100,0	
Концентрат	18,9	84,3	9,3	29,9	29,9	9,63	9,63
Промпродукт	47,8	67,3	15,0	60,4	90,3	39,6	49,23
Хвосты	33,3	15,5	27,6	9,7	100,0	50,77	100,0

Из таблицы видно, что на концентрационном столе при обогащении продукта крупностью -0,25+0,14 мм в концентрат и промпродукт суммарно извлекается сидерита меньше (50,4%), чем на винтовом сепараторе (73,29%). Соответственно при обогащении продукта крупностью -0,14 мм извлекается 49,23% сидерита на концентрационном столе и 71,94% на винтовом сепараторе. Таким образом, по эффективности удаления сидерита концентрационный стол "Holman" предпочтительнее винтового сепаратора. Технологическая схема доводки на концентрационном столе "Holman" коллективного чернового концентрата в закрытом цикле с расчетом циркуляционных нагрузок графически представлена на рисунке. В результате обогащения получен черновой концентрат с содержанием ильменита 89,4% , сидерита 6,3%, при сквозном извлечении на уровне 79,11%.



Обогащение коллективного черного концентрата на концентрационном столе без предварительной его классификации на узкие классы крупности

Выводы

1. Исходные пески, состоящие из шихты каолинов первичных и каолинов вторичных в соотношении 3:1, являются легкопромывистыми и содержат 7,1% ильменита, 5,5% сидерита, около 50,0% илистых шламов. Извлечение ильменита на стадии подготовки песков составляет 96,53 %.

2. Гравитационное обогащение позволяет получить коллективный концентрат с содержанием ильменита 60,1%, сидерита 16,6%. Извлечение по узлу гра-

Гравітаційна сепарація

витації в колективний концентрат досягає 93,02%.

3. Лучшие результаты по гравитационной доводке черного коллективного концентрата имеют место при его обработке узкими классами на концентратном столе типа "Holman", что свидетельствует в пользу принципа однофункциональности разделительных процессов. В этом случае получен концентрат с содержанием ильменита 89,4% при сквозном извлечении 79,11%, в то время как при работе на неклассифицированном питании получен концентрат с содержанием ильменита 77,6% при сквозном извлечении 31,25%.

1. **Кирнарский А.С.** Принцип однофункциональности разделительных процессов при обогащении полезных ископаемых // Горный журнал. – 2010. – № 2. – С. 95-101.

© Кирнарский А.С., Лупей С.А., 2011

*Надійшла до редколегії 20.03.2011 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*