

**А.С. КИРНАРСКИЙ**, д-р техн. наук  
(Германия, Мёнхенгладбах, «Инжиниринг Доберсек ГмбХ»)

## МУЛЬТИГРАВИТАЦИОННОЕ ОБОГАЩЕНИЕ УЛЬТРАТОНКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

### *Введение*

В настоящее время актуальным есть вопрос обогащения минерального сырья ультратонкой крупности (0-50 мкм), в котором содержатся раскрытые рудные зерна при значительном их содержании. Ультратонкие классы составляют значительную часть текущих и лежалых отходов обогащения цветных и благородных металлов, руд черных металлов. Особенно значима эта тема при обогащении хромитовых шламов, что и стало предметом данной работы.

### *1. Обоснование мультигравитационного обогащения*

#### *1.1. Теория*

Ультратонкое хромсодержащее минеральное сырье крупностью менее 50 мкм может обогащаться в настоящее время флотацией по контрастности поверхностных свойств разделяемых минералов, высокоинтенсивной магнитной сепарацией по контрастности в магнитной восприимчивости и гравитационными методами по плотности и крупности обогащаемого минерального сырья. Рудные минералы в шламах хромитовых ОФ представлены преимущественно хромшпинелидами, а нерудные минералы состоят из серпентина и оливина. Такие минералы флотируют в нейтральной среде жирными килотами, а в сильнощелочной среде при  $\text{pH} = 12$  флотируют в основном серпентин, затем при  $\text{pH} = 3$  флотируют хромит и серпентин, а оливин остается в камерном продукте. Таким образом, уместно использовать схему с флотацией серпентина при  $\text{pH} = 12$ , а затем в кислой среде хромита. Как видим, поверхностные, электрохимические, свойства конкурируемых минералов очень близкие. Крупность питания флотации 0,06-0,2 мм. В концентрате получают 44%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Флотация предполагает обесшламливание. Ультратонкая флотация малоэффективна ввиду низкой селективности процесса, значительного расхода флотационных реагентов и необходимости утилизации отходов флотации. Высоинтенсивная магнитная сепарация (ВИМС) зернистых хромитовых шламовых хвостов крупностью 75-300 мкм на роликовом сепараторе при частоте вращения ролика 50 об/мин, напряженности магнитного поля 0,8 Т позволила получить концентрат с содержанием 42,9%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при содержании в питании ВИМС 37,15%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [1]. Перед ВИМС производилось обогащение на мультигравитационном сепараторе (МГС) с последующим обесшламливанием концентрата МГС по крупности 75 мкм. Это наглядный пример того, что ВИМС оправдывает себя при работе на зернистом материале. При подаче ультратонких частиц крупно-

## **Гравітаційна сепарація**

стью менее 50 мкм эффективность ВИМС резко снижается, что обусловлено уменьшением магнитной восприимчивости частиц, кроме того разделяемые минералы хромит и серпентин относятся к парамагнетикам. Если на ультратонких шламах использовать роторные ВИМС, то здесь необходимо считаться с высокой стоимостью оборудования и возможностью забивания матриц частицами коллоидной крупности. Гравитационные методы выгодно отличаются от флотации и ВИМС высокой селективностью разделения, нижним пределом крупности до 5 мкм, низкими капитальными и эксплуатационными затратами. Разделение минералов ультратонкой крупности в гравитационном поле требует не только высокой интенсивности, но и значительного градиента поля. Если интенсивность поля определяет извлечение  $Cr_2O_3$  в концентрат, то градиент определяет селективность процесса разделения. В этом отношении наиболее предпочтительно использовать мультигравитационные сепараторы и/или гидроциклоны малого диаметра. Центробежная сила в зоне МГС – разделения равна

$$F_c = m \cdot R \cdot w^2, \quad (1)$$

где  $m$  – масса минеральной частицы;  $R$  – радиальное удаление частицы от оси барабана;  $w$  – угловая скорость вращения барабана.

Под действием центробежной силы возрастает ускорение силы тяжести  $g^*$ , численное значение которого может быть рассчитано посредством уравнения вида [2]

$$g^* = 5,6 \cdot D \cdot N^2 \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр барабана, м;  $N$  – частота вращения барабана, об/мин.

Таким образом, при частоте вращения барабана 190 об/мин. на частицу воздействует сила, которая в 24 раза превышает силу гравитационного притяжения, т.е.  $g^* = 24g$ .

По закону осаждения Стокса размер частицы равен

$$d = 18\mu V / [(\delta_s - \delta_l) \cdot g], \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр частицы;  $\mu$  – вязкость жидкости;  $V$  – скорость осаждения частицы;  $\delta_s$  – плотность частицы,  $\delta_l$  – плотность жидкости. Используя уравнение 3, приходим к выводу, что повышение силы гравитационного притяжения в 24 раза при вращении барабана МГС 190 об/мин., позволяет получить размер извлекаемого зерна в зоне сепарации МГС, который в пять раз меньше размера зерна, извлекаемого в обычной гравитационном поле при  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ . Таким образом, в условиях мультигравитационного разделения нижний предел крупности составляет 1 мкм, в то время как для обычных гравитационных сепараторов эта величина равна 5 мкм [2]. Повышая частоту вращения барабана с 90 до 150 об/мин., достигаем силовое приращение от 5,5g до 15,1g.

*1.2. Експеримент*

Высказанные теоретические положения подтверждаются экспериментальными данными. Так в работе индийских исследователей [3] представлены результаты мультигравитационной сепарации хвостов обогащения хромитовых руд месторождения Одиса крупностью 89,45% кл. – 75 мкм при содержании  $Cr_2O_3$  на уровне 21,03%. В питании МГС – установки содержание твердого составляло 25%, частота вращения барабана – 150 – 250 об/мин, угол наклона барабана – 2 - 6°, расход промывочной воды – 3 – 9 л/мин, частота колебаний – 4,8 циклов/сек, амплитуда колебаний – 15 – 25 см. Исследования показали, что при повышенной частоте вращения барабана возрастает интенсивность гравитационного поля, что позволяет более полно извлечь частицы тяжелой фракции, но при этом имеет место засорение тяжелой фракции частицами легкой фракции. Расход промывочной воды оказывает значительное влияние на качество концентрата. Так, при увеличении расхода промывочной воды с 3 до 9 л/мин содержание  $Cr_2O_3$  в концентрате увеличилось с 32,43% до 45,69%. Угол наклона регулирует время пребывания материала в зоне сепарации. Чем выше угол наклона, тем больше скорость нисходящего движения промывочной воды и, как следствие, имеет место попадание частиц тяжелой фракции в хвосты обогащения, поэтому качество концентрата повышается, но падает извлечение хромита. Оптимальными условиями МГС – разделения был угол наклона барабана - 4°, частота вращения барабана – 200 об/мин. Качество концентрата в этом случае достигло 45,69  $Cr_2O_3$  при извлечении 56,41%.

*1.3. Практика*

На обогатительной фабрике «Uckorumi Mine» МГС – технология в Турции прошла промышленные испытания для обогащения ультратонких хвостов крупностью 100% – 38 мкм с содержанием  $Cr_2O_3$  на уровне 25,20%. В результате МГС – разделения получили концентрат и хвосты с содержанием  $Cr_2O_3$  соответственно 47,00 и 11,8% при извлечении  $Cr_2O_3$  в концентрат 72%. Режимная карта мультигравитационного обогащения приведена в таблице 1.

*Таблица 1*

Режимная карта МГС – технологии на ОФ «Uckorumi Mine»

Параметры	Единица измерения	Численное значение
Содержание твердого в питании	%	30
Частота вращения барабана	об/мин	200
Амплитуда колебаний	мм	15
Частота колебаний	1/мин	5,7
Угол наклона барабана	градусы	2
Расход промывочной воды	л/мин	2-4

На обогатительной фабрике «Sukinda Odisha» в Индии МГС – технология прошла промышленные испытания для обогащения бедной руды с содержанием  $Cr_2O_3$  на уровне 26,80%. В результате МГС – разделения получили концен-

## **Гравітаційна сепарація**

трат и хвосты с содержанием  $Cr_2O_3$  соответственно 41,00 и 9,34% при извлечении  $Cr_2O_3$  в концентрат 62%. Режим мультигравитационного обогащения приведен в таблице 2.

Таблица 2

Режимная карта МГС – технологии на ОФ «Sukinda Odisha»

Параметры	Единица измерения	Численное значение
Содержание твердого в питании	%	10 - 50
Частота вращения барабана	об/мин	160
Амплитуда колебаний	мм	15
Частота колебаний	1/мин	4,1
Угол наклона барабана	градусы	4
Расход промывочной воды	л/мин	4

После предварительного обоснования выбора мультигравитационного сепаратора в качестве основного разделительного аппарата были проведены пилотные испытания натурной пробы ультратонких хромитовых шламов на сепараторе SCMG1.

### *2. Порядок проведения пилотных испытаний*

#### *2.1. Подготовка пробы к испытаниям*

Исходная проба ультратонких хромитовых хвостов была доставлена в лабораторию гравитационного обогащения в количестве 121 кг в двух бочках (рис.1). Масса первой пробы составляла 58 кг, второй пробы – 63 кг. В условиях заводской лаборатории минимальная масса пробы для проведения испытаний хромитовой руды на мультигравитационном сепараторе составляет 40-60 кг.



Рис. 1. Пилотная установка для обогащения ультратонких хромитовых шламов

Так как исходный материал представлял собой сухие куски («коржи» после фильтрации), то сначала пробы размолотили вручную, а затем их усреднили и загрузили в исходную емкость вместимостью 200 л, которая оборудована ме-

шалкой. Исходя из крупности исходной пробы содержание твердого в питании МГС было принято 20%. Плотность твердой фазы пульпы составляла 3,2 т/м<sup>3</sup>. Таким образом на МГС – обогащение без предварительного обесшламливания поступило 200 л исходной суспензии при содержании твердого по массе 20%, для чего потребовалось 46 кг хромитовых хвостов. Проба перемешивалась в мешалке не менее 2 часов, только после этого исходная пульпа начала подаваться на сепаратор при посредстве перистальтического насоса при постоянной частоте вращения 50 об/мин., что соответствует подаче 2 л/мин. Подача на сепаратор была непрерывной, равномерной и однородной. Забор исходного материала производился при помощи резинового шланга, жестко закрепленного на стенке и глубоко погруженного в приемную емкость. Постоянно отбирались пробы пульпы из емкости в мерные кружки на предмет контроля содержания твердого, для чего кружка взвешивалась и автоматически на шкале регистрировалось значение содержания твердого в процентах. После включения перистальтического насоса в и подачи пульпы на МГС началась работа по переходу сепаратора в устойчивый режим разделения с выделением кондиционного концентрата.

### *2.2. Наладка мультигравитационного сепаратора SCMG1*

При первичной наладке мультигравитационного сепаратора SCMG исходили из того, что проба представлена ультратонкими хвостами низкого качества. В этом случае предпочтительнее работать на разбавленной суспензии при умеренной частоте вращения барабана. Сначала угол наклона барабана составлял 7°. При крутом наклоне разделения не наблюдалось, поэтому плавно понижали угол наклона и отслеживали режим разделения на поверхности барабана. Оптимальный угол наклона составил 3,8. Аналогично поступали с подбором частоты вращения. При высокой частоте вращения наблюдали незначительное выделение тяжелой фракции, поэтому остановились на частоте вращения от 120 до 140 об/мин. Начальная частота вращения барабана была 120 об/мин. Затем ее увеличивали до 125, 130, 135, 140, 145 об/мин. Каждой частоте вращения по диаграммам соответствует ускорение силы тяжести  $g^*$  (см. уравнение 2). Наблюдения за распределением фракций в зоне сепарации показали, что оптимальная частота равна 140 об/мин. Амплитуда осевых колебаний барабана составляла 10 мм, а частота – 5,8 кол/сек. Расход промывочной воды при этом не превышал 2 л/мин. Пробы продуктов разделения отбирались при частоте вращения барабана 135 (1), 140 (проба 2) и 145 (проба 3) 140 об/мин.

### *2.3. Режим мультигравитационного обогащения*

После перевода мультигравитационного сепаратора в устойчивый режим разделения отбирали пробы концентрата и отходов с соблюдением правил опробования. Пробы помещали в лотки, в которых твердая фаза оседала и формировался чистый поверхностный слой вода. После продолжительного отстаивания в конце дня вода декантировалась, в влажная проба помещалась в су-

## **Гравітаційна сепарація**

шильный шкаф на термическую сушку. Химический и гранулометрический состав всех проб определялся в специализированной лаборатории. После получения результатов МГС – обогащения пришли к заключению, что оптимальные конструктивные параметры разделения соответствуют оптимальным технологическим показателям (содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в продуктах разделения, извлечение  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в концентрат). Полученные параметры принимались во внимание при работе сепаратора на обесшламленном материале.

### *3. Результаты испытаний без обесшламливания*

#### *3.1. Оптимальные технологические показатели*

При работе мультигравитационного сепаратора в устойчивом режиме разделения оптимальными следует признать технологические показатели, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3

Оптимальные технологические параметры МГС		
Параметры	Единица измерения	Численное значение
Содержание твердого в питании	%	20
Производительность	л/мин	2
Расход промывочной воды	л/мин	2

На сепарацию поступала чистая водопроводная вода.

#### *3.2. Результаты мультигравитационного обогащения*

После проведения химических анализов были получены следующие результаты (табл. 4). Здесь приведен химический состав продуктов сепарации в наиболее оптимальном технологическом режиме, когда была достигнуто максимальное извлечение хрома в концентрат.

Таблица 4

Химический состав, %	Продукты разделения		
	питание	концентрат	хвосты
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	32,26	58,35	14,49
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	10,18	14,97	5,81
$\text{SiO}_2$	19,14	2,01	17,06
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,14	8,22	2,63
$\text{MgO}$	23,20	14,26	18,79
$\text{CaO}$	2,55	0,29	2,31

Технологические показатели мультигравитационного обогащения сведены в таблицу 5.

*Таблиця 5*

Технологические показатели мультигравитационного обогащения

Показатели	Пробы		
	1	2	3
Содержание Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,%:			
- в концентрате	60,05	58,35	57,10
- в отходах	23,80	14,49	18,99
Выход концентрата,%	23,33	40,52	34,82
Извлечение Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в концентрат,%:	43,44	73,29	61,63

Гранулометрический анализ продуктового обогащения пробы № 2 проводился на лазерном приборе Malvern Mastersizer 3000. Результаты отсева сведены в таблицу 6.

*Таблиця 6*

Гранулометрический состав продуктов МГС

Крупность, мкм	Питание МГС	Продукты МГС	
		Концентрат	Хвосты
1000	100	100	100
600	100	100	100
425	100	100	100
300	100	100	100
212	100	100	100
150	99,87	99,82	99,94
106	98,10	96,01	98,69
75	94,02	86,01	95,72
53	87,69	69,40	91,18
38	79,65	49,23	85,28
26	68,56	26,16	76,37
18	56,97	9,80	65,82
12	44,91	1,60	53,29
8	34,57	0,03	41,50
6	28,34	0	34,17
4	20,81	0	25,26
3	16,10	0	19,67
2	10,31	0	12,71
1,5	6,96	0	8,63
1	3,43	0	4,27
0,7	1,46	0	1,82
0,5	0,41	0	0,52

Как видно из данных таблицы 3.4. в концентрате № 2 нет частиц крупностью менее 8 мкм, что указывает на высокую селективность МГС по крупности зерен.

По завершению опыта без обесшламливания подготовили исходную суспензию для последующего опыта с обесшламливанием по граничной крупности 10 мкм, для чего все продукты разделения после отбора проб перемешивались вместе с оставшимся сухим хромитовым шламом в количестве 73 кг. Содержа-

## **Гравітаційна сепарація**

ние твердого в исходной суспензии перед разделением в гидроциклонах составляло 13% (масс).

### *4. Результаты испытаний с обесшламливанием пробы*

#### *4.1. Оптимальные технологические параметры*

В отличие от предыдущего эксперимента на второй день проведения испытаний 24.01.2020г. было проведено двухстадиальное обогащение. На первой стадии исходный материал направляли на гидроциклонный модуль, включающий центробежный насос, гидроциклон диаметром 50 мм, зумпф и два регулировочных вентиля для управления работой установки. Гидроциклонная установка (ГЦУ) загружалась вспомогательным насосом и/или вручную в случае необходимости. После заполнения зумпфа ГЦУ перекрывался вентиль на гидроциклон, открывали циркуляционный вентиль, включали центробежный насос и осуществляли циркуляцию рабочей суспензии в течение 5-10 мин, после чего открывали вентиль подачи пульпы на гидроциклон, перекрывали циркуляционный вентиль подачи пульпы на зумпф и осуществляли гидроклассификацию хромитовых шламов при избыточном давлении на входе в гидроциклон 3 бара. В процессе наладки пришли к заключению, что оптимальный диаметр песковой насадки гидроциклона должен составлять 6,4 мм. В процессе испытаний отбирали пробы слива и песков. Продукты разделения аккумулировали в емкостях вместимостью 100 л. По завершению гидроциклонирования был накоплен сгущенный (песковый) продукт, который служил исходным продуктом для мультигравитационной сепарации.

#### *4.2. Результаты двухстадиального разделения*

Оптимальные технологические и конструктивные параметры ГЦУ приведены в таблице 7. Результаты химического анализа продуктов обесшламливания в ГЦУ сведены в таблицу 8.

Таблица 7

Оптимальные технологические и конструктивные параметры ГЦУ

Параметры	Единица измерения	Численное значение
Содержание твердого в питании	%	13
Производительность	л/мин.	50
Давление	бар	3
Эффективность классификации	%	65,07
Крупность граничного зерна	мкм	8
Содержание твердого:		
- в песках	%	56,0
- в сливе	%	6,37
Содержание $Cr_2O_3$ :		
- в питании	%	32,26
- в песках	%	43,49
- в сливе	%	16,73
Выход сгущенного продукта	%	58,03
Диаметр песковой насадки	мм	6,4



Химический состав продуктов обесшламливания в ГЦУ

Химический состав, %	Продукты разделения		
	питание	пески	слив
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,26	43,49	16,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,18	12,01	7,44
SiO <sub>2</sub>	19,14	13,10	27,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,14	6,35	3,42
MgO	23,20	14,52	24,62
CaO	2,55	0,49	4,17

По завершению гидроциклонирования был накоплен сгущенный продукт, который служил исходным продуктом для мультигравитационной сепарации. Содержание твердого в песках гидроциклона достигало 56%, поэтому этот продукт в питающей емкости с мешалкой разбавлялся до содержания твердого 26%. Расход промывочной воды остался без изменений и составлял 2 л/мин. Частота вращения барабана изменялась от 120 до 140 об/мин. На сепарацию поступала чистая водопроводная вода.

Технологические показатели мультигравитационного обогащения сведены в таблицу 9.

Таблиця 9

Технологические показатели мультигравитационного обогащения

Показатели	Пробы			
	1	2	3	4
Содержание Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %:				
- в концентрате	56,06	56,66	53,78	53,59
- в отходах	27,22	24,81	21,74	18,58
- в питании	43,49	43,49	43,49	43,49
Выход концентрата, %	56,41	58,65	67,88	71,15
Извлечение Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в концентрат, %:	72,72	76,41	83,94	87,68

**Выводы**

1. Проведение пилотных испытаний ультратонких хромитовых шламов на предмет их гравитационной обогатимости на мультигравитационном сепараторе подтвердили возможность выделения кондиционного концентрата без обесшламливания исходного продукта при оптимальных конструктивных и технологических параметрах мультигравитационного разделения.

2. Нагрузка на сепаратор была непрерывной, равномерной и однородной при подаче 2 л/мин. Содержание твердого в исходной пульпе составляло 20%, расход промывочной воды 2 л/мин. Оптимальная частота вращения барабана не превышала 140 об/мин. Угол наклона барабана составлял 3,8°. Извлечение Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в концентрат при работе на рядовом шламе достигает 73,28% при качестве тяжелой фракции 58,5% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

3. При работе на обесшламленном питании резко сокращается фронт мультигравитационной сепарации при достижении приемлимых технологических

показетелей. Коструктивные параметры МГС при работе на обесшламленном продукте практически не изменяются.

### **Список литературы**

1. N. Aslan, H. Kaya. Beneficiation of chromite concentration waste by multi-gravity separator and high – intensity unduced – roll magnetic separator/The Arabian Journal and engineering. – Volume 34, № 28. – 2009, p. 285-297.
2. B.S.K Chan, R.H. Mozley, G.J.C.Childs/Mineral Engineering, Volume 4, № 3/4, 1991, p.489-496.
3. Sunil Kumar Tripathy, Yanamandra Rama Murthy, Vilas Tathavadkar, Mark Bernad Densys. Efficacy of multi gravity separator for concentrating ferruginous chromite fines/Journal of Mining and Metallurgy, № 48, 2012, p.39-49.
4. S.G. Özkan, B. Ipekoglu. Concentration om Chromit Tailings by Multi Gravity Separator/17<sup>th</sup> International Mining Congress and Exhibiton of Turkey, 2001.
5. A. Mohano Rao, R.K. Rath, M.K. Mohanta, B. Dey, M. Sahoo, R. Sing. Beneficiation Studies on low Grade Ores using Multi Gravity Separator/International Seminar on Mineral Processing Technology, 2017.

© Кирнарский А.С., 2019

*Надійшла до редколегії 05.10.2019 р.  
Рекомендована до публікації д.т.н. П.І. Піловим*