

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СЕРТИФИКАЦИИ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ «ВИМС»



Научный совет по методам
технологических исследований

Методические рекомендации № 103

**ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ РУД ЧЕРНЫХ И ЛЕГИРУЮЩИХ
МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ КРУПНОКУСКОВОЙ СЕПАРАЦИИ**

Москва, 2014 г.

РАЗРАБОТАНЫ: Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского» (ФГУП «ВИМС»)

СОСТАВИТЕЛИ: Рябкин В.К., Литвинцев Э.Г., Гулин Е.Н.

РАССМОТРЕНЫ И ПРЕДСТАВЛЕНЫ К УТВЕРЖДЕНИЮ: Научным советом по методам технологических исследований (НСОМТИ), протокол №1 от 31 октября 2014 г.

Председатель НСОМТИ



Handwritten signature of S.I. Ivanov

Иванков С.И.

Ученый секретарь НСОМТИ

Handwritten signature of V.N. Sokolova

Соколова В.Н.

УТВЕРЖДЕНЫ: Федеральным научно-методическим центром лабораторных исследований и сертификации минерального сырья «ВИМС» (ФНМЦ)

Руководитель ФНМЦ «ВИМС»:

Handwritten signature of A.A. Rogozhin

Рогожин А.А.

Методические рекомендации предназначены для работников предприятий и организаций, осуществляющих деятельность в сфере недропользования независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности. Применение настоящих Методических рекомендаций обеспечит получение геолого-технологической информации, полнота и качество которой достаточны для принятия решений о проведении дальнейших геологоразведочных работ.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	5
2. МЕТОДЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КРУПНОКУСКОВОЙ СЕПАРАЦИИ	6
2.1. Радиометрическое обогащение.....	6
2.2. Магнитное обогащение.....	7
3. ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ РУД ЧЕРНЫХ И ЛЕГИРУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ КРУПНОКУСКОВОЙ СЕПАРАЦИИ	8
3.1. Геологическая характеристика материала пробы.....	9
3.2. Определение гранулометрического состава технологической пробы.....	10
3.3. Отбор представительных выборок для изучения технологических свойств руды.....	12
3.4. Лабораторные исследования на кусках выборок.....	13
3.5. Оценка обогатимости руды по результатам исследования выборки.....	15
3.6. Выбор метода сепарации и признака разделения.....	18
3.7. Определение границ разделения радиометрической сепарации.....	19
3.8. Экспериментальное определение режимов и границ разделения метода сухой магнитной сепарации.....	23
3.9. Опытная радиометрическая сепарация лабораторной технологической пробы.....	24
4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ (КРУПНОТОННАЖНЫХ) ИСПЫТАНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ РУД РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	27
5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ	29
ЛИТЕРАТУРА	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Руководство по программе расчета фракционного состава и технологических показателей «Kontrast»...	31
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Таблицы	33

Принятые сокращения и обозначения:

ГРР – геологоразведочные работы;

РО – радиометрическое обогащение;

РРМ – рентгенорадиометрический метод и другие методы (см. примечание к табл. 2);

РРС – рентгенорадиометрическая сепарация;

ПФМС – полихромная фотометрическая сепарация и др. методы сепарации;

СМС – сухая магнитная сепарация;

М – показатель неравномерности (контрастности по В.А. Мокроусову);

α – среднее содержание компонента в выборке (пробе), %;

$\gamma_{\text{хв}}$, $\gamma_{\text{к}}$ – выход хвостового и концентратного продуктов, %;

$\epsilon_{\text{хв}}$, $\epsilon_{\text{к}}$ – извлечение полезного компонента в хвостовой (потери) и концентратный продукты, %;

θ – содержание компонента в хвостовом продукте, %;

β – содержание компонента в обогащенном продукте, %;

λ – граница разделения (сепарации), верхний предел фракционирования;

τ – показатель кратности обеднения хвостов относительно среднего содержания;

П – показатель признака разделения;

Р – показатель раскрытия минерала полезного компонента.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящими методическими рекомендациями регламентируются исследования по технологической оценке обогатимости руд черных и легирующих металлов методами крупнокускового обогащения в лабораторных и опытно-промышленных условиях с применением радиометрических и магнитных методов покусковой сепарации, использующих раскрытие отбитой горнорудной массы на стадии добычи и крупного дробления.

Областью применения методических рекомендаций являются технологические испытания крупнокусковой обогатимости руд черных и легирующих металлов на разных стадиях геологоразведочных работ с использованием лабораторных, укрупненно-лабораторных и полупромышленных проб (табл. 1).

Таблица 1

Назначение и виды технологических проб для стадий ГРП

Стадия, категория ресурсов и запасов	Цель технологических испытаний	Вид проб	Минимальная* масса пробы
Поисковые и оценочные работы; P ₁ , C ₂ , C ₁	Технологическое изучение для выделения промышленных (технологических) типов руд	Лабораторные	0,1-1 т
	Разработка рациональных схем и исходных данных к технологическому регламенту	Укрупненно-лабораторные	1,5-5 т
Разведка месторождения (проектный период); C ₁ , B, A	Разработка оптимальных схем по извлечению основных и попутных компонентов	Типовые и сортовые лабораторные	0,1-1 т
	Исходные данные к технологическому регламенту для проектирования	Укрупненно-лабораторные	1,5-5 т
	Технологический регламент для проектирования	Полупромышленные	20-3000 т

*Определяется требованием надежной массы пробы в зависимости от неравномерности руды

Процесс крупнокускового обогащения включает в себя рудоподготовку для выделения машинных классов крупности, подлежащих сепарации, и мелких классов, составляющих небогащаемый продукт (отсев). На конечном этапе процесса отсев, который, как правило, оказывается в той или иной мере обогащенным полезным компонентом, присоединяется к концентратам или промежуточным продуктам сепарации.

Методы крупнокусковой сепарации в первую очередь решают задачи предварительного обогащения путем выделения отвальных крупнокусковых хвостов. На рудах черных металлов (хромовых, марганцевых и железных) возможно собственно обогащение с получением кондиционных крупнокусковых металлургических концентратов.

2. МЕТОДЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КРУПНОКУСКОВОЙ СЕПАРАЦИИ

2.1. Радиометрическое обогащение

Промышленно применяемая радиометрическая сепарация (РС) – технология разделения горнорудной массы на продукты, различающиеся по содержанию полезных компонентов или вредных примесей, использующая измеряемые параметры взаимодействия различных видов излучения с веществом руды. Радиометрическое обогащение относится к сухим процессам переработки твердых полезных ископаемых, отличается от традиционных методов обогащения экологической чистотой и низкой себестоимостью обогащения руд при относительно малых капитальных затратах.

Разработан обширный арсенал методов покусковой сепарации (табл. 2), которые используют многообразие специфических свойств руд, обладают достаточно высокой чувствительностью и селективностью разделения в широком диапазоне крупности кускового материала от 5 до 350 мм. В настоящее время практическое применение находят следующие виды сепарации: рентгенорадиометрическая (РРС), рентгенолюминесцентная (РЛС), фотометрическая (ФМС), рентгеноабсорбционная (ХРТ) и гаммарадиометрическая (ГРС).

Таблица 2

Методы радиометрической сепарации, используемые для обогащения
руд черных и легирующих металлов

Полезный компонент	Методы* (глубинность исследования)	Предел обнаружения**, %
Be	ФНМ (20 см), ФММ (мкм)	0,1
Ti	РРМ (мкм), РАМ (50 мм), РЛМ (мкм), ФММ (мкм)	1,0
Cr	РРМ (мкм), ФММ (мкм), РАМ (50 мм)	1,0
Mn	РРМ (мкм), ФММ (мкм), РАМ (50 мм)	0,5
Fe	РРМ (мкм), ФММ (мкм), РАМ (50 мм), ГАМ (50 мм)	0,5
Co, Ni	РРМ (мкм) ИРМ (см), ЕРМ (см)	0,1
Cu, Zn, Pb	РРМ (мкм), ИРМ (см), ЕРМ (см)	0,1
Zr, Y, Nb	РРМ (мм), ФММ (мкм)	0,05
Mo	РРМ (мм)	0,05
TR	РРМ (мм)	0,03
W	РРМ (мм), РЛМ (мкм)	0,1
U, Th	ГРМ (20 см)	0,004

* Методы: ГАМ – гамма-абсорбционный, ГРМ – гаммарадиометрический, ЕРМ – емкостной радиорезонансный, ИРМ – индукционный радиорезонансный, РАМ – рентгеноабсорбционный, РЛМ – рентгенолюминесцентный, РРМ – рентгенорадиометрический, ФММ – фотометрический (как вариант ПФММ – полихромный фотометрический метод), ФНМ – фотонейтронный

** Метрологическая оценка на гомогенных моделях при доверительной вероятности 95%

Современное оборудование радиометрической сепарации приведено в табл. 3.

Технические характеристики отечественных и зарубежных сепараторов

Типоряд сепараторов (изготовитель)	Класс крупности, мм	Условия измерения	Кол-во каналов (ручьев)	Детектор	Источники возбуждения	Макс. производительность, т/ч
<i>Рентгенорадиометрические</i>						
СРФ3-300, СРФ4-150; СРФ4-3П-150, СРФ4-50 (ООО Радос, Красноярск)	-300+25	свободное падение	3-4	СИ-11Р2,3 СИ-13Р SDD	РТ	50
РМ-2003, РМ-100Р, РМ-50Р (ЗАО Интегра, Москва)	-200+25	лента тр.	2	ПС	РТ	30
<i>Рентгенолюминесцентные</i>						
ЛС-ОД-50-05 (НПП Буревестник, СПб)	-50+5	свободное падение	4	ФЭУ-100-1	РТ	30
ЛСФ-50, ЛСМ-50 (ТОО ЭГОНТ, СПб)	-50+10	свободное падение	2	ФЭУ-100-1	РТ	30
<i>Фотометрические</i>						
Graviti, BeltKompakt, GemStar (Aliud GmbH, Гамбург, ФРГ)	-250+1	свободное падение	монослой	Фотокамера	люм. лампы	250
Pro-Secondary Color (TOMRA, Wedel, ФРГ)	-250+2	свободное падение	монослой	Фотокамера	люм. лампы, лазер	250
<i>Радиорезонансные</i>						
ROM Secondary EM (Commodas Ultrasort GmbH, Wedel, ФРГ)	-80+20	лента тр.	монослой	катушка индуктивности	–	80
<i>Гаммарадиометрические</i>						
Вихрь, Ишим, Агат, РСР-4 (НПК АиМ Восточный ГОК, Желтые Воды, Украина)	-200+25	свободное падение	2-4	NaJ	–	120
ROM Primari, Secondary RM (Commodas Ultrasort GmbH, Wedel, ФРГ)	-250+20	лента тр.	монослой	NaJ	–	250
<i>Гамма-рентгеноабсорбционные</i>						
Минерал-50-Р-100МЛ, Рубин (НПК АиМ Восточный ГОК, Желтые Воды, Украина)	-100+25	лента тр.	2-6	NaJ	Gd-153 Am-241	30
ROM Primary XRT (Commodas Ultrasort GmbH, Wedel, ФРГ)	-50+5	лента тр.	монослой	NaJ	РТ	50

Примечание: РТ – рентгеновская трубка; SDD – кремниевый-дрейфовый детектор; ПС – пропорциональный счетчик

За рубежом интенсивно разрабатываются фотометрические, рентгеноабсорбционные и электромагнитные (радиорезонансные) сепараторы. В СССР разрабатывалась относительно широкая номенклатура сепараторов, из которых в настоящее время в России выпускаются только рентгенорадиометрические и рентгенолюминесцентные сепараторы.

2.2. Магнитное обогащение

Для крупнокускового магнитного обогащения руд с сильномагнитными минералами (магнетит, титаномагнетит и яковсит) используется сухая магнитная сепарация (СМС) с применением сепараторов на постоянных

магнитах NdFeB с магнитной индукцией до 8000 Гс (80 Тл). В настоящее время сепараторы этого типа выпускаются в России и Украине, табл. 4.

Таблица 4

Оборудование крупнокусковой сухой магнитной сепарации сильномагнитных руд

Тип сепаратора* (изготовитель)	Максимальная крупность, мм	Максимальная индукция, Тл	Диаметр барабана, мм	Ширина транспортной ленты, мм	Производительность, т/час
БСМ 900x200 (НПО «Эрга» г. Калуга, Россия)	80	80	900	2000	300
АМТ&С (ООО «ПМТиК» г. Троицк, Россия)	300	90	800	2000	200
СБ-140-4 (НПП «РЕДМАГ» г. Москва, Россия; НПФ «Продэкология» г. Ровно, Украина)	80	40	1400	1600	300
СДВМ-1,2/2,5D (НТЦ «МАГНИС ЛТД» г. Луганск, Украина)	80	80	1200	2400	450
КММР-2/2 (НТЦ «МАГНИС ЛТД» г. Луганск, Украина)	450	80	2000	2200	700

* Приводится марка и характеристики представителей типоряда сепараторов, обладающих максимальной производительностью и предельной крупностью перерабатываемых кусков

Для магнитного обогащения слабомагнитных руд легирующих металлов при большой крупности куска (>80 мм) аппараты с полями высокой магнитной индукции отсутствуют.

3. ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ РУД ЧЕРНЫХ И ЛЕГИРУЮЩИХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ КРУПНОКУСКОВОЙ СЕПАРАЦИИ

Оценка обогатимости руд крупнокусковыми методами радиометрической и магнитной сепарации состоит из двух этапов: изучение свойств руды, влияющих на обогатимость, и экспериментальное определение технологических показателей обогащения.

На первом этапе изучаются геолого-минералогические особенности руды, ее вещественный состав, гранулометрический состав, неравномерность кусков по содержанию основных и попутных компонентов и их корреляционные связи. При этом устанавливается принципиальная возможность применения методов крупнокусковой сепарации, эффективность выбранного признака разделения и эффективность раскрытия рудных минералов, а также предельные показатели разделения по содержанию ценных компонентов.

На втором этапе выбираются типы сепараторов и режимы сепарации, определяются технологические показатели, разрабатывается принципиальная технологическая схема крупнокускового обогащения, и компонуются продукты для последующей переработки.

3.1. Геологическая характеристика материала пробы

Объектом технологических испытаний является технологическая проба руды, отобранная согласно Методическим рекомендациям № 102 «Отбор технологических проб при геологоразведочных работах на рудные полезные ископаемые» [1]. Масса отбираемой пробы должна учитывать массы получаемых продуктов радиометрического обогащения, необходимые для последующей переработки методами глубокого обогащения. Необходимым условием получения достоверного технологического результата является соответствие пробы техническим условиям (ТУ) отбора с подтверждающими ее представительность документами: Актом отбора пробы и Паспортом пробы. Указанные позиции согласовываются при заключении договора на технологические испытания и служат основанием для разработки программы исследований или отказа от проведения работ.

Исследуемый материал в принципе должен отвечать руде изучаемого технологического типа после отбойки и сортировки на рудоконтролирующей станции (РКС), т.е. кондиционной руде. В случаях, когда сортировка на РКС не предусматривается, отбирается руда, по качеству отвечающая планируемым эксплуатационным запасам, с заданным разубоживанием и засорением.

Лабораторная технологическая проба в силу своего ограниченного объема не может быть представительной для отбитой руды по гранулометрическому составу из-за недостаточности по массе или отсутствия крупных классов, несоответствия количества и качества мелкого класса вследствие несоответствия способа отбора паспорту буровзрывных работ при добыче. В результате крупнокускового радиометрического обогащения полученная от Заказчика проба (табл. 5) преобразуется в так называемую *исходную* пробу, исправленную по соотношению классов гранулометрического состава (см. раздел 3.2).

Определение вещественного состава исходной пробы с анализом химического и минерального составов проводится на материале дубликата технологической пробы, предназначенном для проведения работ по глубокому обогащению. При отсутствии такой возможности представительная навеска формируется на заключительном этапе работ из материала крупностью -1 мм, который получается в процессе разделки продуктов сепарации с учетом их выходов. Масса навески должна составлять не менее 1 кг.

3.2. Определение гранулометрического состава технологической пробы

Перед проведением лабораторных и укрупненно-лабораторных испытаний кускового материала должен быть обеспечен верхний предел крупности, отвечающий требованиям надежности массы пробы для заданной степени неравномерности распределения рудного компонента в соответствии с условиями, предлагаемыми эмпирической формулой Чечотта [2]:

$$d = \sqrt[2]{P/k},$$

где: d – диаметр куска в мм по верхнему пределу максимального класса крупности;

P – масса пробы в кг;

k – коэффициент пропорциональности, равный 0,05 при равномерном; 0,1 – неравномерном; 0,2 – весьма неравномерном и 0,5 кг/мм² – крайне неравномерном оруденении. К примеру, массе лабораторной пробы 1 т при неравномерном оруденении отвечает верхний предел крупности 100 мм, для которого количество кусков размером >100 мм должно составлять не более 5%.

Надежная масса керновых проб рассчитывается исходя из диаметра керна, а не длины столбика, которая доводится до заданного размера. Соответственно кусковой материал пробы целиком подвергается грохочению по верхнему пределу крупности, при этом плюсовой материал додрабливается и присоединяется к основному.

Проба перемешивается на специальной площадке лопатами по методике из «кольца в конус» не менее трех раз. Затем подвергается грохочению на классы крупности, принятые для выбранного метода РО, например, для РРС -100+75, -75+50, -50+25, -25+0 мм, а для ФМС дополнительно -25+10 и -10+5 мм. Классы, подлежащие сепарации, называются машинными. Последний класс крупности (отсев) -25+0 мм делится на более узкие классы только в случае экономической эффективности их обогащения сепарацией (сюда относятся самоцветы и драгоценные камни, руды некоторых редких и драгоценных металлов). В большинстве случаев отсев обогащается полезными компонентами и присоединяется к концентратам сепарации. Все классы взвешиваются. Данные с результатами последующих анализов на основные компоненты заносятся в таблицу гранулометрического состава (табл. 5).

При отборе проб небольшой массы невозможно обеспечить представительное распределение выходов кускового материала по классам крупности, фактический гранулометрический состав используется только при расчете технологических показателей опытной сепарации, в то время как требования корректности оценки обогатимости вынуждают использовать прогнозный гранулометрический состав, взятый по месторождениям-аналогам или из таблиц усредненного гранулометрического состава (табл. 6 и 7) [3].

Таблица 5

Гранулометрический состав пробы руды Кайгадатского месторождения
после додрабливания до крупности -100 мм

Классы крупности, мм	Фактическая масса, кг	Выход, %		Среднее содержание**, %		Извлечение прогноз, %		Коэффициент обогащения	
		фактический	прогнозируемый*	Mn	Fe	Mn	Fe	Mn	Fe
-100 + 75	300,8	51,49	32,0	9,18	13,92	31,92	31,20	0,99	0,98
-75 + 50	80,3	13,75	17,0	9,25	13,93	17,00	16,62	1,00	0,98
-50 + 25	165,1	28,26	21,0	9,24	13,93	20,99	20,53	1,00	0,98
-25 (отсев)	38,0	6,50	30,0	9,27	14,97	30,11	31,56	1,00	1,05
Исходная проба, в т.ч. машинные классы	584,2	100,0	100,0	9,24	14,23	100,00	100,00	1,00	1,00
	546,2	93,50	70,0	9,22	13,92	69,89	8,44	1,00	1,00

* – данные усредненного гранулометрического состава из табл. 6 и 7

** – содержания компонентов, определенные по результатам анализов продуктов сепарации

Таблица 6

Усредненные характеристики крупности взорванной горнорудной массы

Крупность классов, мм	Суммарный выход классов по минусу, %, при крупности продукта, мм						
	-1000	-800	-600	-500	-400	-300	-150*
-1000	95	–	–	–	–	–	–
-800	88	95	–	–	–	–	–
-600	80	87	95	–	–	–	–
-500	73	81	90	95	–	–	–
-400	66	73	83	89	95	–	–
-300	57	64	73	80	87	95	–
-200	44	50	60	66	73	83	98
-100	26	31	37	44	50	60	78
-50	15	18	22	26	31	37	50
-25	8	–	–	–	–	14	29

*Обработка данных по жильным рудам [4]

Таблица 7

Усредненные характеристики крупности разгрузки дробилок крупного дробления

Крупность классов, мм	Суммарный выход классов по минусу, %, при крупности продукта, мм					
	-350	-300	-250	-200	-150	-100
-350	95	–	–	–	–	–
-300	88	95	–	–	–	–
-250	81	87	95	–	–	–
-200	74	79	86	95	–	–
-150	62	68	75	84	95	–
-100	47	51	58	68	79	95
-75	37	41	47	56	68	84
-50	27	31	35	41	51	68
-25	14	17	20	24	30	41
-15	7	10	12	15	20	27

Кусковой материал машинных классов при естественной влажности и слабой запыленности пригоден к дальнейшим исследованиям. В случае обволакивания поверхностей кусков шламом, который скрывает текстурно-структурный рисунок и содержит рудные компоненты (марганцевые, сурьмяные и др. руды), искажающие результаты измерения малоглубинными методами сепарации (РРС, РЛС, ФМС), куски подвергаются промывке. При наличии глинистых корок используется замачивание, промывка и обдирка в скруббер-буторах в качестве дополнительных операций рудоподготовки.

При укрупненных и полупромышленных технологических испытаниях выполняются сравнительные испытания сепарации руды представительных по массе порций с промывкой и без промывки (кроме случаев относительно чистой руды или наличия глинистых корок) для надежной оценки влияния загрязнения кусков при сепарации. Подобный эксперимент достаточно проводить только на одном классе крупности. В зависимости от полученных результатов дальнейшие экспериментальные работы с получением технологических показателей ведутся либо без промывки (сухой процесс), либо с промывкой (ограниченно мокрый процесс).

При больших массах машинных классов для этих исследований допускается отквартовка представительных порций с соблюдением требований представительности и надежности массы согласно формуле Чечотта.

Технологические этапы и параметры рудоподготовки оформляются в виде схемы (см. рис. 6), которая должна помещаться в отчете.

3.3. Отбор представительных выборок для изучения технологических свойств руды

Изучение технологических свойств руды для сепарации методами крупнокускового обогащения и выбор оптимального признака разделения производится на представительной выборке кусков класса крупности -50+25 мм как наиболее оптимальном для исследований. Опыт применения радиометрического обогащения в урановой отрасли [5, 6] показывает, что относительные отклонения рассматриваемых ниже технологических показателей по классам крупности в диапазоне -150+20 мм (реальном для лабораторных условий) отличаются не более чем на 5%.

Выборка представляет собой совокупность кусков, связанную с генеральной совокупностью кусков выделенного для сепарации класса крупности статистическими зависимостями. Количество кусков определяется с ориентацией на экспериментальные данные относительных погрешностей среднего содержания \hat{S}_a , выхода хвостов \hat{S}_γ , содержания в хвостах \hat{S}_θ и потерь с хвостами \hat{S}_ϵ для выборок объемом 50, 100 и 200 кусков на рудах с различным показателем неравномерности M (табл. 8). Из таблицы видно, например, что в случае крайне неравномерных руд $M > 1,5$ обеспечить высокую представительность выборки по среднему содержанию полезного компонента и потерям с хвостами невозможно.

Величина погрешности технологических параметров отвальных хвостов при различных объемах выборки (оценка по 20 случайным выборкам из 900 кусков)

Объем выборки, n кусков	Относительные среднеквадратические отклонения \hat{S} , %											
	Пласто-линзообразные руды с равномерным оруденением M = 0,4				Жильно-прожилково-вкрапленные руды с неравномерным оруденением M = 0,9				Редковкрапленные руды с крайне неравномерным оруденением M = 1,5			
	\hat{S}_a	\hat{S}_γ	\hat{S}_θ	\hat{S}_ε	\hat{S}_a	\hat{S}_γ	\hat{S}_θ	\hat{S}_ε	\hat{S}_a	\hat{S}_γ	\hat{S}_θ	\hat{S}_ε
50	5,3	15,6	10,7	8,2	20,2	12,2	17,8	7,0	42,6	6,3	15,3	33,6
100	4,1	9,4	7,6	5,2	14,8	8,8	15	3,7	36,7	3,0	9,6	33,2
200	–	–	–	–	–	–	–	–	29,3	2,2	6,7	28,2

Отбор выборки в n – кусков производится от предназначенной для сепарации массы из N кусков класса крупности $-50+25$ мм путем взятия каждого кратного N/n куска по счету при переключении из мешка в мешок. При отборе выборки от неперемешанных порций интервалов керна можно использовать случайные №№ кусков, выданные генератором случайных чисел компьютера для заданной совокупности из общего количества кусков.

Случайный способ отбора кусков определяет представительность выборки. Каждый кусок промывается, после просушки нумеруется и взвешивается. Выполняется визуальная геологическая документация с кратким обозначением вида породы и интенсивности рудной минерализации. Полезную информацию дает фотодокументация выборки на лотке при различаемой нумерации кусков. Подобная визуализация кусков в дальнейшем будет способствовать более правильной геологической интерпретации результатов измерений.

3.4. Лабораторные исследования на кусках выборок

Случайный характер выборки кусков дает объективную информацию о вещественном составе руды (минеральном и элементном), текстурно-структурных особенностях на уровне крупности куска, которая используется при выборе метода сепарации (табл. 2). При этом в качестве признака разделения метода сепарации выступают физические свойства руд и вмещающих пород, фиксируемые непосредственно детекторами (сенсорами) или с использованием внешнего возбуждающего воздействия различного вида излучением и физическими полями. Параметром признака разделения является так или иначе обработанный результат измерения признака разделения. Куски выборки исследуются с применением комплекса специально приспособленной (моделирующей геометрию камеры сепаратора) измерительной аппаратуры, условно называемой «аппаратурой признаков разделения» (АПР). Примерный комплекс АПР включает:

– спектрометрическую рентгенорадиометрическую установку, использующую в качестве возбуждающих устройств рентгеновские трубки с Ag, W или Re анодами и соответствующими фильтрами. Для достижения

высокой селективности измерений целесообразно применение радионуклидных источников: Fe55, Cd109, Am241, Co57. В комплексе с полупроводниковыми детекторами, имеющими высокое энергетическое разрешение, обеспечивается измерение характеристического рентгеновского излучения элементов от Ca до U с максимальной селекцией;

- рентгенолюминесцентную установку с возбуждением люминесценции, например, трубкой типа 5БХВ-6 при анодном напряжении до 50 кВ и регистрацией ФЭУ-100 с использованием пороговых светофильтров УФС-2, СС-8 и ОС-12;

- гамма-спектрометр со спектрометрическим детектором NaJ(Tl) для определения U, Ra, Th и К по естественной радиоактивности;

- измеритель добротности (Q-метр) типа Е9-4 с плоскими катушками на резонансные частоты 1,75 и 13,56 мГц;

- измеритель магнитной восприимчивости каппаметр КТ-6.

На рентгенорадиометрических установках вследствие малой глубинности метода измерения производятся по двум сторонам с набором статистики за время 30-60 секунд. Определяются нормированные на рассеянное излучение аналитические параметры K_{α} линий для элементов с $Z < 58$, а для элементов с $Z > 58$ параметры $L_{\alpha, \beta}$ линий характеристического излучения (т.н. **спектральные отношения** η) для всех элементов, представляющих интерес при формировании параметра признака разделения. Если позволяет программное обеспечение аппаратуры, селективность метода и эффективность признака разделения могут быть повышены путем вычитания фона, учета наложения линий мешающих элементов по способу Долби и учета избирательного подвозбуждения линиями вторичного характеристического излучения, превышающими по энергии К-край возбуждения измеряемого элемента [7].

На рентгенолюминесцентных установках в качестве параметров признаков разделения используются измерения потоков люминесцентного свечения с фильтрами, представляемые в виде абсолютных величин, спектральной разности или спектральных отношений. В алмазной сепарации используются параметры кинетики затухания люминесценции.

Для других методов в качестве параметров признака применяются абсолютные величины измеряемого параметра, такие как интенсивность гамма-излучения при установленных уровнях дискриминации гаммарадиометрического метода или добротность контура Q с последующим расчетом активного и реактивного сопротивлений, значения магнитной восприимчивости в соответствующих единицах для радиорезонансного и магнитометрического методов.

Изучение кускового материала фотометрическим методом выполняется путем поочередной подачи кусков в камеру сепаратора с фотографированием двух сторон куска для получения площадных параметров проявления цветовой характеристики в системе RGB или в другой используемой аналитической системе.

К данным исследованиям в обязательном порядке добавляется определение плотности кусков методом гидростатического взвешивания кусков в воде и воздухе, результаты которых, оформленные в виде таблицы фракционного анализа, представляют интерес для предварительной оценки возможности обогащения руды методами отсадки и тяжелосредной сепарации.

После выполнения комплекса необходимых измерений каждый кусок измельчается до порошковой пробы аналитической крупности -70 или -40 мкм в зависимости от требований методики анализа. Лабораторный анализ на основные компоненты в ряде случаев должен сопровождаться ИСП-анализом на 58 элементов, что позволит использовать корреляционные связи при выборе косвенного признака разделения.

3.5. Оценка обогатимости руды по результатам исследования выборки

Исходя из целесообразности решаемых в процессе крупнокускового обогащения задач, выделяются два основных вида разделения кондиционной руды:

– предварительное обогащение руды с выделением отвальных хвостов и получением обогащенного продукта (концентрата) радиометрического обогащения;

– собственно обогащение с получением конечного концентрата, отвечающего техническим условиям, промпродукта и отвальных хвостов.

При предварительном обогащении руды основным фактором, определяющим показатели процесса, служит неравномерность содержаний основного компонента по кускам. Для количественной оценки степени неравномерности В.А. Мокроусовым [8] было предложено использовать показатель М, равный отношению средневзвешенному отклонению содержания полезного компонента в кусках выборки от среднего по выборке, который получил название показателя «контрастности Мокроусова» (далее в тексте в соответствии с его смысловым значением определяется как показатель неравномерности). Величина М рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |(c_i - \alpha)q_i|}{\alpha},$$

где: n – число кусков в выборке;

α – среднее содержание ценного компонента в выборке, % (г/т);

c_i – содержание ценного компонента в отдельных кусках выборки, % (г/т);

q_i – доля массы i -го куска в выборке, доли единицы.

Величина М принимает значения от 0 до 2. Особенности, вытекающие из свойства среднего, позволяют выразить показатель М через технологические показатели разделения по граничному среднему содержанию:

$$M = 2\gamma_{\text{хв}} \left(1 - \theta/\alpha\right),$$

$$M = 2\gamma_k \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right),$$

где: $\gamma_{\text{хв}}$ и γ_k – выходы хвостов и концентрата, отн. ед.;
 θ и β – содержание в хвостах и концентрате, %.

Это дает возможность оценивать обогатимость руд за счет удаления хвостов в зависимости от степени неравномерности руды и предложить классификацию руды по «показателю контрастности М» (табл. 9).

Таблица 9

Классификация руд по показателям неравномерности М и раскрытия Р

Предварительное обогащение		Обогащение с получением конечного концентрата	
Категория руд по неравномерности (контрастности)	Показатель М	Категория руд по раскрытию	Показатель Р
Весьма равномерные (неконтрастные)	<0,5	Нераскрытые	<0,55
Равномерные (низкоконтрастные)	0,5-0,7	Со средним раскрытием	0,55-0,74
Неравномерные (контрастные)	0,7-1,1	С высоким раскрытием	>0,75
Весьма неравномерные (высококонтрастные)	1,1-1,5		
Сверхнеравномерные (особоконтрастные)	>1,5		

При обогащении руды с получением конечного продукта в качестве показателя эффективности предложено [9] использовать показатель раскрытия руной минерализации Р, определяемый конечным выражением:

$$P = \frac{M}{2(1 - \alpha)},$$

где: α – среднее содержание полезного минерала в выборке, отн. ед., равное среднему содержанию полезного компонента, деленному на его среднюю долю в минеральном зерне.

Опираясь на предельные результаты разделения и используя значения показателей М и Р (названия в авторской транскрипции) (табл. 9), можно сделать предварительные выводы о возможности обогащения руды и целесообразности получения тех или иных продуктов, а следовательно планировать дальнейшие экспериментальные работы с лабораторной технологической пробой.

При высокой степени раскрытия $P > 0,75$ возможно получение высококачественных товарных концентратов. Для руд со средним раскрытием $P = 0,55-0,74$ и «контрастностью» $M > 0,5$ целесообразно выделение трех продуктов: товарного концентрата, отвальных хвостов и промпродукта, направляемого на глубокое обогащение. При $P < 0,55$ и $M > 0,5$ возможно выделение отвальных хвостов. При $P < 0,55$ и $M < 0,5$ руда необогатима методами крупнокускового обогащения. При этом следует всегда иметь в виду, что данные оценки получены на выборке от пробы.

Экспериментальная оценка обогатимости руды базируется на результатах анализа кусков выборки по основным компонентам. Куски разбиваются на фракции по содержанию основного компонента с

последующим расчетом интегрального распределения накопленных выходов хвостов γ_{XB} и извлечений ε_{XB} , представляющих совместно со средним содержанием компонента **предельные показатели разделения** для заданных границ разделения λ по содержанию. Расчеты выполняются вручную или с использованием прилагаемой к Методике в интернете программы «Kontrast» (Приложение 1). Результаты расчетов на примере выборки железомарганцевой руды Кайгадатского месторождения по содержанию Mn представляются в виде таблицы фракционного состава (табл. 1 Приложения 2). Графическое представление распределения кусков по содержанию (рис. 1) свидетельствует о значительном различии рудных кусков от кусков вмещающей породы по Mn.

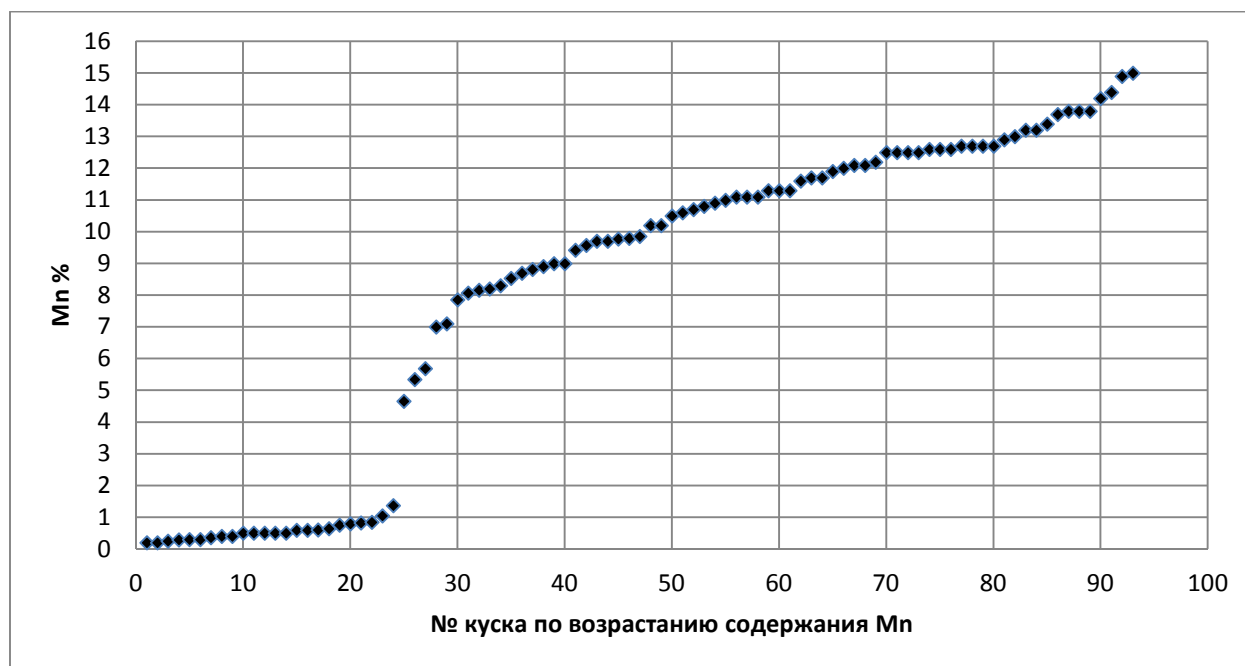


Рис. 1. Распределение кусков выборки пробы железомарганцевой руды после ранжирования по содержанию Mn

Анализ данных таблицы и характера зависимостей параметров обогащения от значения границы разделения (рис. 2) показывает принципиальную возможность получения отвальных хвостов с выходом $>20\%$ от машинного класса. Ориентировочные значения границы разделения λ , выхода хвостов, их качество и потери металла рекомендуется определять в точке пересечения кривых зависимостей показателей степени обеднения хвостов τ и извлечения в хвосты ε_{XB} от граничного содержания λ , где $\tau = \varepsilon_{XB}$. Показатель τ имеет смысловое значение кратности обеднения хвостов по сравнению со средним содержанием в пробе (аналогично показателю обогащения) и выражается в виде:

$$\tau = \frac{\alpha}{\theta} = \frac{\gamma_{XB}}{\varepsilon_{XB}}.$$

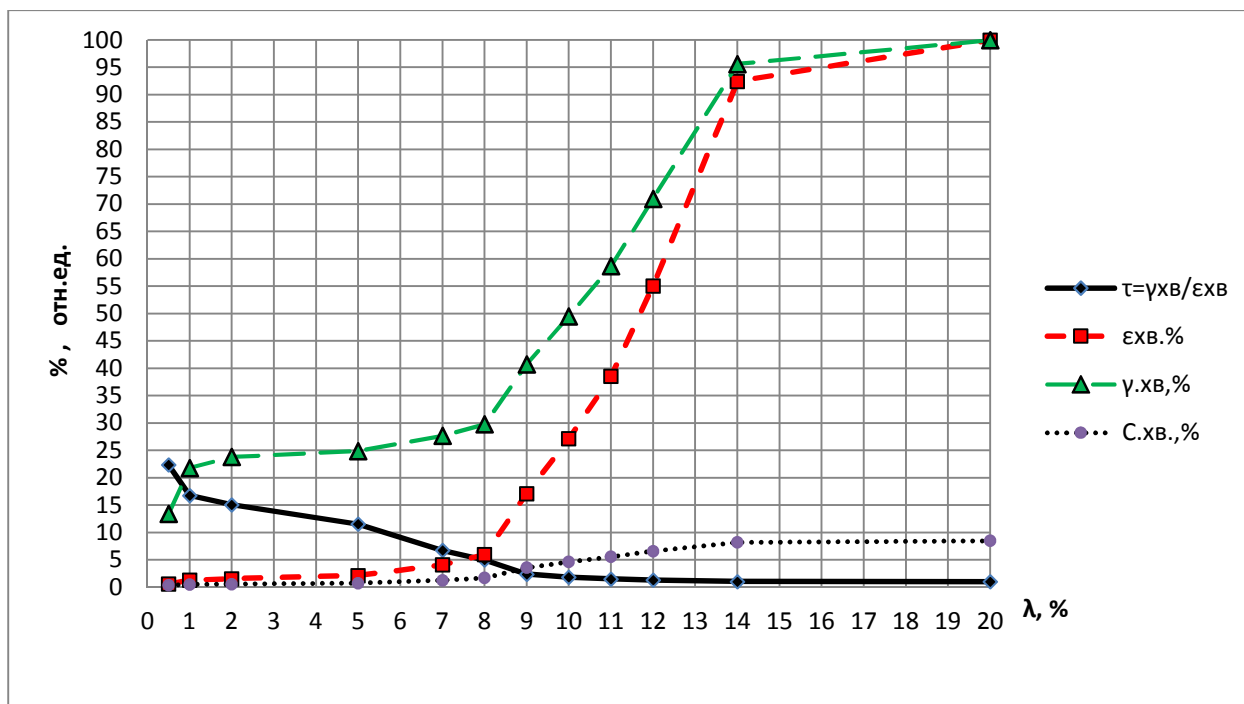


Рис. 2. Зависимости параметров обогащения от границы разделения на выборке 100 кусков пробы железомарганцевой руды

Параметр $\epsilon_{хв}$ (потери с хвостами) может расцениваться как обобщающий экономический показатель. При этом необходим учет кондиции по минимальному промышленному содержанию в руде, составляющей для Кайгадатского месторождения 5% Mn. Это означает, что средние содержания в богатых фракциях хвостов (табл. 1 Приложения 2) не должны превышать 5% Mn. Соответственно, границу разделения следует понизить до $\lambda=5\%$ Mn, которой соответствует выход хвостов 24,9% с содержанием в них 0,74% Mn при извлечении 2,16%. Полученные на выборке показатели следует рассматривать в качестве **предельных показателей разделения для данной выборки** от лабораторной технологической пробы с учетом представительности последней. Применение к ним терминологии – «теоретические показатели по руде», практикуемое в научных отчетах и технической литературе, неправомерно.

Распределения попутных компонентов по фракциям основного компонента и продуктам разделения представляется в аналогичных таблицах (табл. 2 Приложения 2).

3.6. Выбор метода сепарации и признака разделения

При выборе метода сепарации и признака разделения производится сравнение предельных показателей разделения по выборке (табл. 1 Приложения 2) и предельных технологических показателей метода сепарации, полученных в результате фракционирования данных анализа кусков выборки по заданным пределам измерения параметра разделения на АПР, например, по параметру η РРМ, (табл. 3 Приложения 2). В этой таблице рудные куски начинают выделяться в концентрат при границе $\eta=0,08$. При

этом выход хвостов составляет 23,83% с содержанием 0,56% Mn при извлечении (потерях) 1,58%.

Для оценки воздействия процесса измерений на качество разделения рассчитывается показатель признака разделения Π , который определяется как максимум относительного средневзвешенного отклонения содержаний полезного компонента от среднего содержания в руде для фракций, которые получают путем последовательного добавления кусков в порядке возрастания признака разделения:

$$\Pi = 2 \max \sum_{i=1}^n \frac{(c_i - \alpha) \gamma_i}{\alpha},$$

где: n – номер фракции по возрастанию величины признака разделения;
 γ_i – выход фракции, отн. ед.

При разделении по содержанию показатели Π и M тождественно равны. Величина показателя Π меняется в пределах от 0 до 2. Мерой соответствия между признаком разделения и содержанием полезного компонента является величина эффективности признака разделения $\mathcal{E}_\Pi = \Pi/M$.

Величина эффективности признака разделения используется в качестве критерия при выборе признака разделения и метода сепарации, т.е. позволяет по данным измерений выборки сравнивать как признаки разделения внутри метода, так и методы разделения между собой. Приемлемыми считаются значения \mathcal{E}_Π от 0,8 до 1,0.

3.7. Определение границ разделения радиометрической сепарации

Метод сепарации и тип сепаратора определяются в соответствии с показателями, полученными в разделе 3.6, и номенклатурой аппаратуры (табл. 3 и 4).

Выбранный ранее на установке АПР параметр признака разделения воспроизводится на сепараторе с использованием рудных кусков путем измерений в статических условиях. Устанавливаются оптимальные для сепарации условия возбуждения и регистрации, необходимые способы учета мешающих факторов. При регистрации рентгеновского излучения пропорциональными или сцинтилляционными счетчиками (метод РРС) проводятся мероприятия по минимизации частотного сдвига спектра с изменением загрузок «фон – кусок» сигнального тракта. Для этого выбирается режим с минимальным высоким напряжением при сохранении приемлемого энергетического разрешения.

Предварительное определение границы выделения хвостов производится на сепараторе с использованием **кусков той же выборки**, которые подвергаются анализам. Куски раздельно пропускаются через камеру сепаратора, где измеряются в динамическом режиме с набором статистики за реальный для сепарации промежуток времени порядка 0,03÷0,1 с. На рис. 3 приведен пример градуировки сепаратора СРФ2-100 с характерным разбросом величины измеренного параметра в области консолидации породных и рудных кусков с перерывом между ними.

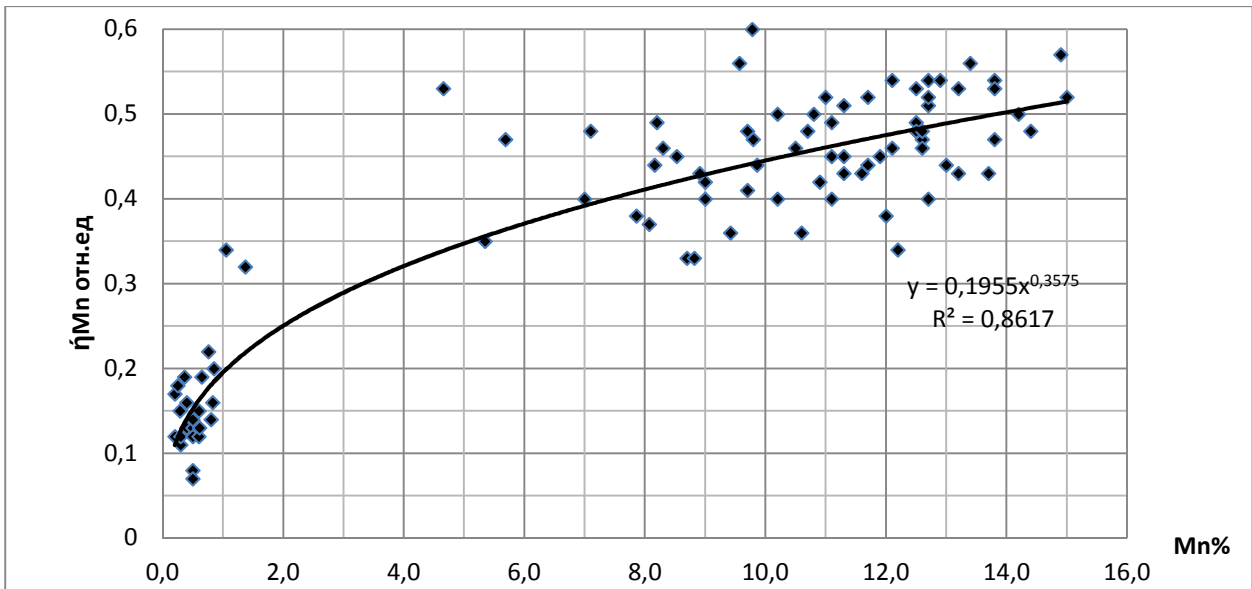


Рис. 3. Корреляционная связь измеряемого параметра η и C_{Mn} на сепараторе СРФ2-100

Ориентировочная граница разделения и предварительные технологические показатели РРС по выборке получаются в результате анализа фракционного состава (табл. 4 Приложения 2) и зависимостей, показанных на рис. 4. Кривая τ носит ниспадающий, а кривая $\epsilon_{xв}$ — нарастающий характер. Они пересекаются в точке $\epsilon_{xв}=5\%$, которой соответствует технологическая граница выделения хвостов $\eta_{Mn}=0,33$. Однако, в таблице фракционного состава содержание Mn во фракции η 0,30-0,33 превышает минимальное промышленное для этой руды 5% Mn. Соответственно, граница сепарации должна быть снижена до $\eta=0,30$.

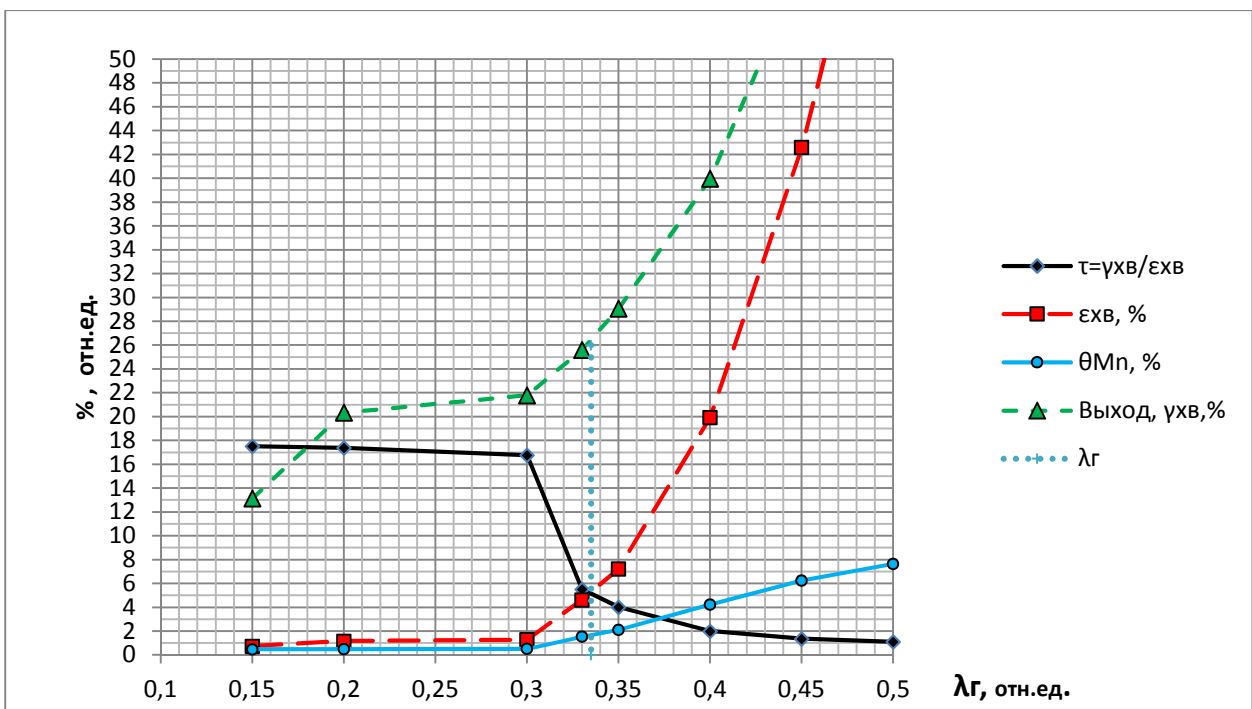


Рис. 4. Предварительный выбор границы разделения на сепараторе СРФ2-100

Уточнение границы сепарации на промышленном сепараторе проводится экспериментальным путем на представительных навесках для классов крупности -100+75, -50+25 и -10+5 мм. Опыты по выделению сепарацией отвальных хвостов выполняются методом так называемой «фракционной» разгонки с поочередным выделением заданного концентрата и трех концентратов при последовательном понижении границы сепарации λ и, соответственно, содержания полезного компонента в хвостах. В качестве примера на рис. 5 приведена схема фракционной разгонки методом полихромной фотометрической сепарации (ПФМС) по площади бурого и желтого цвета с отделением черных рудных кусков пробы марганцевой руды Селезеньского месторождения. По результатам анализа продуктов производится их объединение (табл. 10).

Таблица 10

Результаты последовательного разделения пробы массой 75 кг класса крупности -10+5 мм при разных границах сепарации λ

№ фр.	Граница сепарации, λ , отн. ед.	Фракция	Выход		Содержание Mn, %	Извлечение Mn, %
			кг	%		
1	0,95	Концентрат 1	9,9	13,14	46,92	28,24
2	0,90	Концентрат 2	12,9	17,21	39,08	30,81
3	0,75	Концентрат 3	21,7	29,01	25,89	34,40
4	0,65	Концентрат 4	17,0	22,73	4,38	4,56
5		Хвосты	13,4	17,91	2,42	1,99
Выделенные продукты						
1, 2	0,90	Концентрат	22,8	30,35	42,47	59,05
3	0,75	Промпродукт	21,7	29,01	25,89	34,40
4, 5	0,65	Хвосты	30,5	40,64	3,52	6,55
Исходная проба			75,0	100,0	21,83	100,0

Выбранные границы разделения для класса могут быть распространены на смежный с ним более крупный класс (в данном примере -25+10 мм). При небольшой массе лабораторных проб (керновые пробы) данными опытами заканчивается весь цикл экспериментальных работ.

В тех случаях, когда основной компонент не может быть зафиксирован измерительным устройством сепаратора из-за низкого содержания или условий возбуждения (T_i , V , S_o и др.), используются косвенные признаки разделения такие, как содержание попутного компонента, парагенетически связанного с основным при значимой величине коэффициента корреляции $r > 0,7$. Тогда граница сепарации для выделения хвостового продукта выбирается в пределах вариации среднего значения параметра косвенного признака разделения на пустой породе $\hat{\eta}_{cp} + \sigma_{\eta}$ со статистической вероятностью выделения пустых кусков 83%. Интересен опыт сепарации по попутному компоненту при условии совпадения низких значений содержаний попутного и основного компонентов.

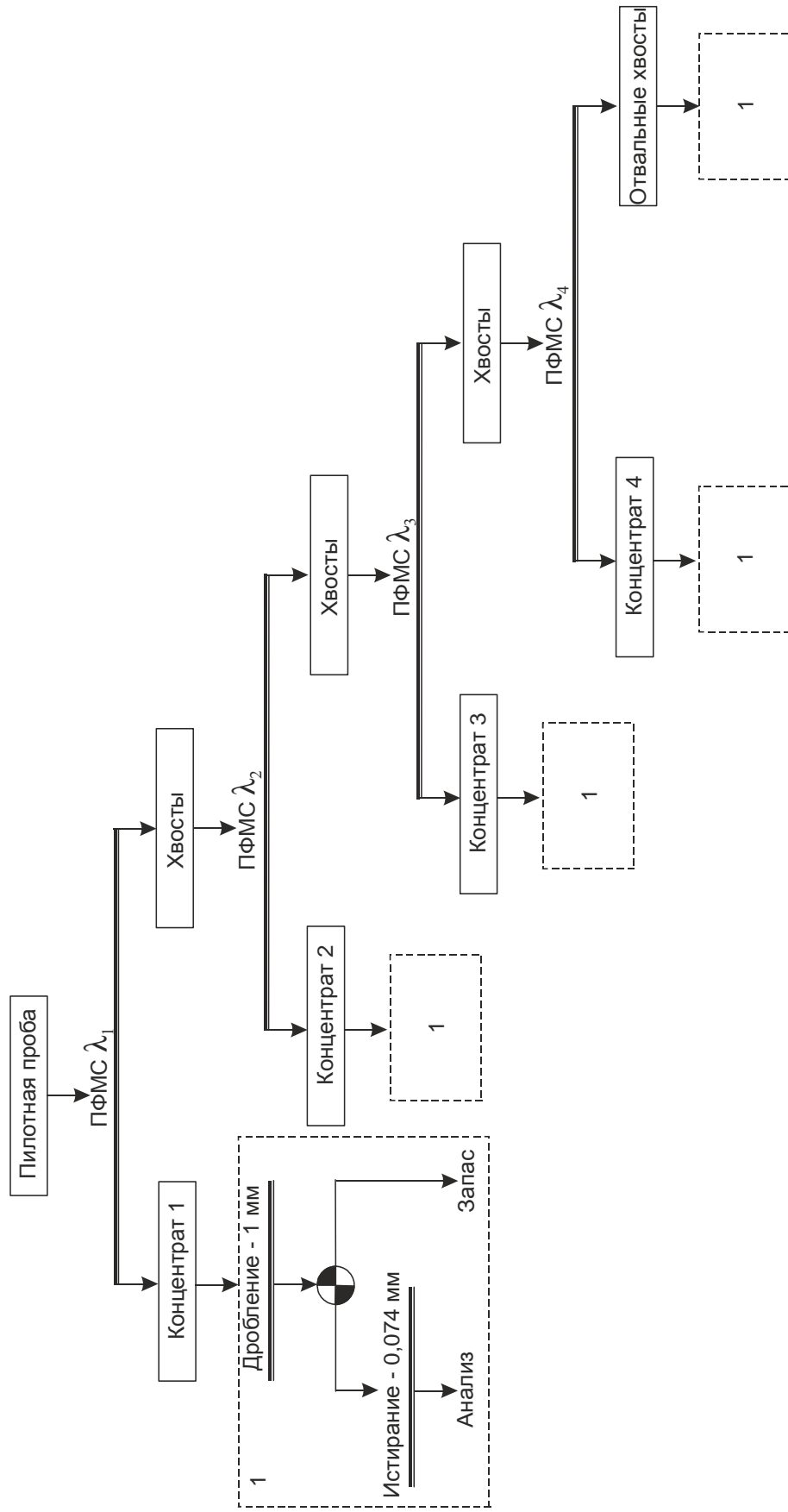


Рис. 5. Фракционная разгонка пробы горнорудной массы марганцевой руды месторождения Селезень при разных значениях границы λ методом ПФМС (по схеме 1 производится опробование продуктов)

На многокомпонентных рудах и при использовании косвенных признаков разделения появляется необходимость применения многопараметровых признаков разделения, в том числе и многомерных, для аппаратуры, реализующей несколько методов сепарации [10].

Окончательный выбор границы сепарации производится с учетом выхода и качества хвостов, потерь с ними металла на основе повариантного экономического расчета для обогатительного передела в целом.

3.8. Экспериментальное определение режимов и границ разделения метода сухой магнитной сепарации

Процесс экспериментального изучения обогатимости руд методом сухой магнитной сепарации имеет ограничения. В первую очередь они связаны с экранирующим влиянием мелкого класса крупности -20+0 мм, обогащенного магнитными минералами, существенно ухудшающим показатели сепарации. Мелкий класс выводится из процесса путем предварительного грохочения и направляется непосредственно на глубокое обогащение. С другой стороны, в лабораторных условиях существуют определенные ограничения по верхнему пределу крупности перерабатываемого материала. Крупные классы приходится предварительно дробить до крупности -75 мм с выделением двух классов крупности -75+50 и -50+20 мм, от которых отбираются представительные навески массой до 200 кг.

Изучение магнитного разделения материала рекомендуется выполнять на сепараторе-анализаторе АМБ-06С «МАГНИС Лтд» с дискретным изменением величины напряженности магнитного поля и частоты вращения барабана. Пример магнитного фракционирования руды железистых кварцитов Костомукшского месторождения с выделением магнитной и немагнитной фракций приведен в табл. 11.

Таблица 11

Фракционирование методом СМС железистых кварцитов класса крупности -40+20 мм на сепараторе-анализаторе АМБ-0,6С при частоте вращения барабана 12 об.мин

Магнитная индукция, Гс	Фракция СМС	Выход, %	Содержание Fe _{mgt} , %	Извлечение Fe _{mgt} , %	Содержание Fe _{общ.} , %	Извлечение Fe _{общ.} , %
500	Магнитная	45,58	25,13	92,41	28,93	78,31
	Немагнитная	54,42	1,73	7,59	6,71	21,69
	Исходный класс	100,00	12,39	100,00	16,84	100,00
1000	Магнитная	46,55	24,20	90,95	28,01	77,44
	Немагнитная	53,45	2,10	9,05	7,11	22,56
	Исходный класс	100,00	12,39	100,00	16,84	100,00
2000	Магнитная	48,44	23,60	92,30	27,44	78,96
	Немагнитная	51,56	1,85	7,70	6,87	21,04
	Исходный класс	100,00	12,39	100,00	16,83	100,00

Оптимальную границу СМС в данном случае определяют минимальные потери Fe_{mgt} при максимальном выходе немагнитной фракции, что выполняется при напряженности поля 5 Тл (500 Гс) и оптимальной частоте вращения барабана. Полученное значение принимается в качестве граничного при последующих опытных работах и полупромышленных испытаниях СМС. Опытная магнитная сепарация из-за больших размеров и массы сепаратора, а также оборудования оснастки выполняется только в промышленных условиях.

3.9. Опытная радиометрическая сепарация лабораторной технологической пробы

Проведение опытной радиометрической сепарации позволяет прямым экспериментом при достаточном объеме кускового материала пробы получить технологические показатели для классов крупности руды и оценить эффективность работы сепаратора, сопоставив с технологическими показателями, полученными при оценке обогатимости.

При проведении опытной сепарации разделительное устройство сепаратора должно быть настроено на вероятность срабатывания $>0,9$ при паспортной производительности и нагрузке на отсечку до 40% кусков. Для выполнения последнего условия предусмотрен реверсивный режим, дающий возможность отбивать как концентрат, так и хвосты.

Технологическая схема опытной сепарации (рис. 6) включает основные и контрольные операции. Контрольная сепарация должна подтверждать необходимое качество хвостов и эффективность работы сепаратора. При ненадлежащем качестве хвостов контрольная сепарация рекомендуется к включению в производственную технологическую схему.

Все продукты подвергаются разделке и опробованию по соответствующей схеме (рис. 6). Технологические показатели сепарации сводятся в таблицу по принятому варианту схемы (табл. 12). Нормируя полученные показатели на предельные показатели разделения и технологические показатели метода с АПР, рассчитываются показатели эффективности процесса сепарации и эффективности работы сепаратора по выделению отвальных хвостов или концентратов.

Ожидаемые (прогнозные) технологические показатели радиометрического обогащения без учета контрольной сепарации (табл. 13) рассчитываются с привлечением несепарируемого класса (отсева) и учетом прогнозного гранулометрического состава, полученного экспериментальным путем на месторождениях-аналогах или по усредненным данным из справочника [3]. Особо следует выделить значение отсева, выход и качество которого при отборе проб небольшой массы без использования способа взрывной отбойки в навал неrepresentative, поэтому параметры отсева следует брать из опыта отработки месторождений-аналогов. Появляющаяся при этом возможность корректировки данных позволяет сводить баланс показателей радиометрического и глубокого обогащения.

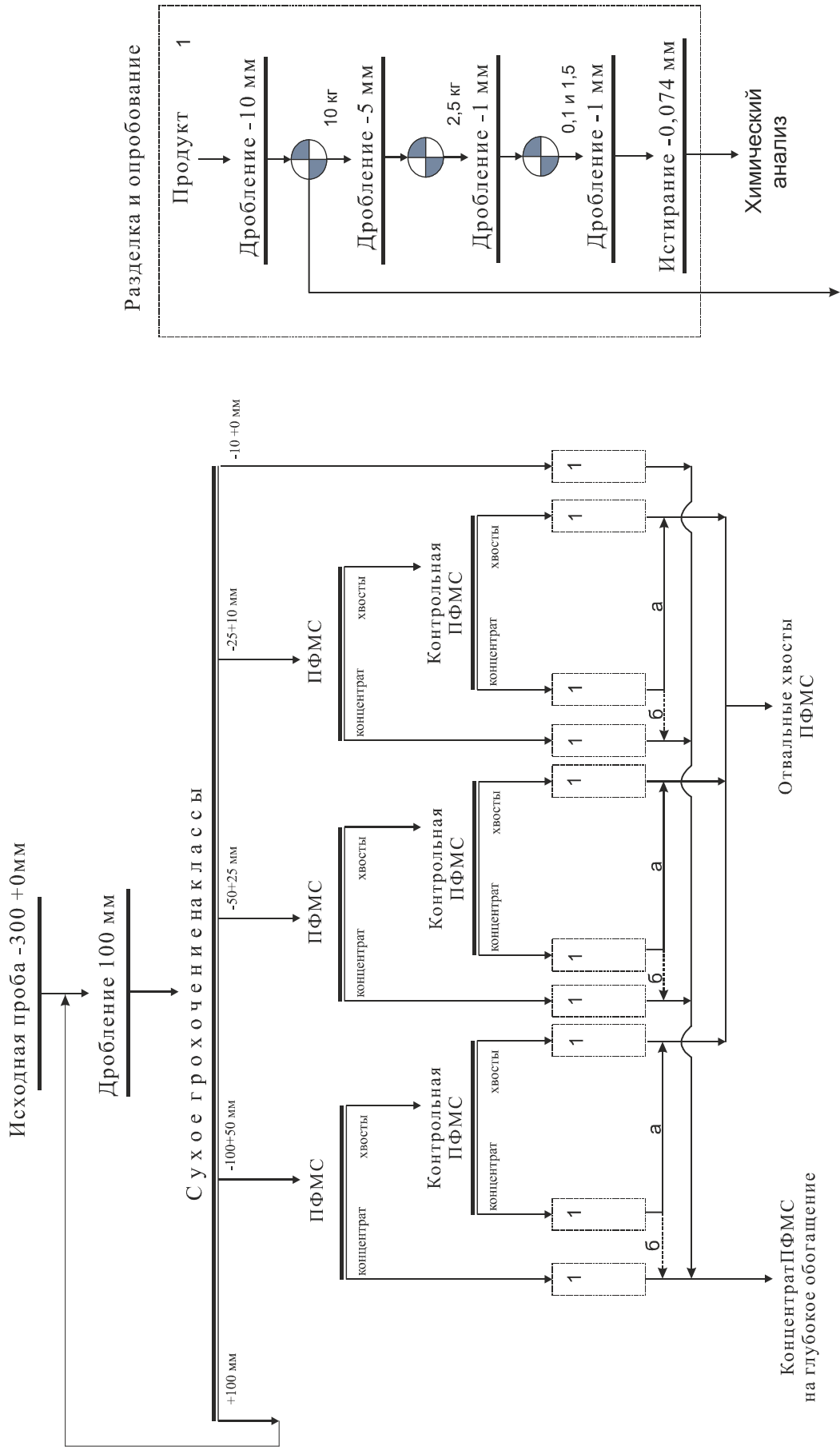


Рис. 6. Технологическая схема опытной сепарации методом ПФМС (и других методов) основного материала пробы с выделением отвалыных хвостов при использовании в технологическом процессе:

а – только основной сепарации, б – основной и контрольной сепарации

Таблица 12

Технологические показатели опытной сепарации с выделением отвальных хвостов

Продукты	Выход, %		Содержание ценных компонентов, %			Извлечение ценных компонентов от класса, %			Извлечение ценных компонентов от суммы сепарируемых классов, %		
	от класса	от Σ классов	C ₁	C ₂	C ₃	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
Класс крупности -100+50 мм											
Концентрат											
Хвосты											
Исходный класс	100,0					100,0	100,0	100,0			
Классы крупности -50+25 мм, -100+10 мм (те же строки)											
Сепарируемый класс крупности -100+10 мм											
Σ Концентрат	–					–	–	–			
Σ Хвосты	–					–	–	–			
Сепарируемые кл. крупности	–	100,0				–	–	–	100,0	100,0	100,0

Таблица 13

Технологические показатели предварительного обогащения пробы методом ПФМС с выделением отвальных хвостов

Продукты	Выход, %		Содержание ценных компонентов, %			Извлечение ценных компонентов от класса, %			Извлечение ценных компонентов от исходной пробы (прогноз), %		
	от класса	прогнозный	C ₁	C ₂	C ₃	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
Класс крупности -100+50 мм											
Концентрат											
Хвосты											
Исходный класс	100,0					100,0	100,0	100,0			
Классы крупности -50+25 мм, -25+10 мм (те же строки)											
Сепарируемые классы крупности -100+10 мм											
Σ Концентрат											
Σ Хвосты											
Исходный класс	100,0					100,0	100,0	100,0			
Прогнозируемые показатели радиометрического обогащения по вариантам (вариант 1,2,...)											
Σ Концентрат	–					–	–	–			
Σ Хвосты	–					–	–	–			
Отсев -10 мм	–					–	–	–			
Σ Конц.+отсев	–					–	–	–			
Исходная проба	–	100,0				–	–	–	100,0	100,0	100,0

В сводной таблице подчеркиваются особенности технологических показателей по отдельным классами крупности, подводится итог по сумме сепарируемых классов и отражается вклад несепарируемого класса (отсева) в обогащенный продукт. В итоге предлагаются и обосновываются оптимальные варианты объединения продуктов с получением конечного продукта РО.

От концентратов машинных классов и отсева путем отквартовки отбираются навески для составления пробы обогащенного продукта радиометрического обогащения на последующий передел, по которому выдаются расчетные балансовые показатели. Аналитические работы выполняются в рамках входного контроля на последующем этапе обогащения.

Качество отвальных хвостов радиометрического обогащения контролируется объединенной пробой, составленной путем отквартовки навесок от мелких классов крупности –1 (2) мм всех продуктов отвальных хвостов. Масса пробы не менее 1 кг. Проба направляется на минералогический, силикатный, количественный химический анализы.

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ (КРУПНОТОННАЖНЫХ) ИСПЫТАНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ РУД РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Полупромышленные крупнотоннажные испытания по изучению обогатимости руд проводятся с целью проверки и корректировки технологических схем радиометрического обогащения, разработанных на стадии лабораторных исследований, уточнения технологических показателей и эффективности процессов, получения исходных данных для проектирования обогатительных комплексов на горно-обогатительных предприятиях. Испытания проводятся по отдельному проекту на специальных установках, укомплектованных промышленным оборудованием, включающих систему рудоподготовки (дробление, грохочение), аппаратов сепарации, подачи руды и опробования продуктов обогащения.

Полупромышленные испытания проводятся по технологической схеме и методике, рекомендованной в результате лабораторных исследований. Для испытаний отбирается соответствующая технологическая проба (табл. 1).

Испытания предусматривают:

- анализ технико-экономических показателей объекта (предприятия) результатов лабораторных испытаний по методике и технологии обогащения, уточнение технологической схемы обогащения и требований к технологическим показателям и качеству продукции;

- контроль представительности технологической пробы и ее доставку к месту испытаний;

- компоновку, наладку, настройку технологической линии и оборудования, градуировку аппаратуры, проверку стабильности ее работы;

– проверку соответствия технологической линии и оборудования требованиям техники безопасности, радиационной гигиены и противопожарной техники, соответствующий инструктаж и подготовку обслуживающего персонала;

– разделение исходной пробы на две части, одна из которых используется для радиометрической сепарации, а другая поступает на переработку традиционными методами глубокого обогащения;

– грохочение исходной пробы на классы крупности с определением их массы. Выделение несепарируемого класса, его опробование, взвешивание и складирование для дальнейших исследований. Взвешивание материала питания и продуктов сепарации на конвейерных весах;

– организацию опробования технологических продуктов с помощью автоматического пробоотборника;

– организацию аналитической службы с обеспечением достоверного экспресс-анализа основных компонентов;

– оценку технологических свойств руды на кусковых выборках;

– проведение пилотных испытаний порций расклассифицированной руды массой 10-20 т с отработкой режимов работы сепараторов, а также питателей и промывочного оборудования. Основные параметры сепарации, подлежащие регулировке: производительность и граничное значение признака разделения, определяющие выход хвостов. В качестве основного значения первого параметра принимаются показатели, рекомендованные специалистами компании-производителя сепараторов. При выборе начального значения порога разделения руководствуются данными лабораторных исследований, далее проводятся испытания с изменением указанных показателей в большую и меньшую стороны. В процессе проведения работ по каждому исследуемому параметру производится технико-экономический расчет показателей. Экономическая эффективность принимается в качестве основного критерия при выборе оптимальных режимов сепарации;

– проведение балансовых испытаний проб расклассифицированной руды массой 2-5 тыс. т по выбранным в результате пилотных испытаний оптимальным режимам сепарации. Определение итоговых технологических показателей;

– составление акта о проведении полупромышленных испытаний.

Дубликат исходной пробы и обогащенный продукт сепарации передаются на технологические испытания обогатимости методами глубокого обогащения.

Результаты полупромышленных испытаний технологии радиометрического обогащения вместе с данными исследований исходной руды и продуктов крупнокускового обогащения традиционными методами глубокого обогащения являются основой для составления технологического регламента на проектирование предприятия.

5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ

Аппаратура и оборудование, применяемые при изучении обогатимости руд радиометрическими методами, относятся к классу электромеханических устройств, включающих радионуклидные источники или генераторы рентгеновского излучения.

При эксплуатации радиометрических установок вне зависимости от реализуемого метода должны выполняться: «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правила устройства электроустановок», утвержденные Госэнергонадзором.

При использовании в установках источников ионизирующего излучения должны соблюдаться требования, установленные «Нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009», «Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСПОРБ 99/2010».

К работе с установками для изучения радиометрической обогатимости руд допускаются лица, прошедшие инструктаж и показавшие знания правил техники безопасности. Периодичность инструктажа должна соблюдаться не реже 2-х раз в год.

Загрузка и выгрузка источников ионизирующих излучений должна производиться двумя исполнителями с использованием специализированных дистанционных манипуляторов.

Работающие на радиометрических установках должны иметь средства индивидуального дозиметрического контроля.

Неиспользуемые в установках источники ионизирующих излучений должны храниться в спецхранилищах.

Работы на установках, оснащенных источниками ионизирующих излучений, разрешается проводить в помещениях, на которые санитарно-эпидемиологическими службами оформлен санитарный паспорт. Специальных требований к помещениям для размещения радиометрических установок не предусматривается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации НСОМТИ № 102 «Отбор технологических проб при геологоразведочных работах на рудные полезные ископаемые». М.: ВИМС. 2018. 27 с.
2. Альбов М.Н. Опробование месторождений полезных ископаемых. М.: Недра. 1975. 232 с.
3. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. Под редакцией О.С. Богданова, В.А. Олевского. 2-е изд. М.: Недра. 1982. 368 с.
4. Проблемы разрушения горных пород и совершенствования технологии разработки месторождений полезных ископаемых. М.: Недра. 1969. С. 127-132.
5. Пухальский Л.Ч. Рудничная геофизика. М.: Энергоатомиздат. 1983. 120 с.
6. Архипов О.А. Радиометрическая обогатимость руд при их разведке. М.: Недра. 1985. 144 с.
7. Якубович А.Л., Рябкин В.К. Ядерно-физические методы анализа и контроля качества минерального сырья. М.: ВИМС. 2007. 206 с.
8. Мокроусов В.А., Гольбек Г.Р., Архипов О.А. Теоретические основы радиометрического обогащения радиоактивных руд. М.: Недра. 1968. 172 с.
9. Барский Л.А., Рубинштейн Ю.Б. Кибернетические методы в обогащении полезных ископаемых. М.: Недра. 1970. 276 с.
10. Литвинцев Э.Г. Комплексование радиометрических методов при сепарации одно- и многокомпонентных руд / Обогащение руд. №2, 1984. С. 15-17.

Руководство по программе расчета фракционного состава и технологических показателей «Kontrast»

Подготовка исходного файла Excel

Подготовка файла данных в **Excel** самостоятельного или в виде части сводной таблицы требует одинакового количества данных в столбцах. При этом количество данных не более 3200. Запоминается имя файла, порядковый № от начала листа, № первой строки данных файла, буквенные обозначения столбцов, отвечающие расчетным параметрам.

Расчеты и построения с программой «Kontrast»:

1. В первом окне «Программа» открывается «файл» – «открыть исходные данные». В появившемся окне «Загрузка файла» проставляется порядковый от начала № листа, № строки данных столбца. Записывается количество столбцов содержаний, не считая столбца параметра. Латиницей «EN» заносятся буквенные обозначения используемых для расчета столбцов. Отмечается точкой – расчет карманов по содержанию (контрастности) или по параметру (обогащаемости).

11. Щелчком «Ок» вызывается окно выбора файла Excel, где выполняется его открытие. В окне «Программа» показываются столбцы данных с возможностью их корректировки. Если замечена ошибка, ее следует исправить, развернув исходный файл **Excel**, сохранить и заново его открыть.

12. Командой «Перевести данные» открывается окошко «Условие расчета 1», в котором задается вид распределения по карманам: по содержанию (расчет контрастности) и по параметру.

13. Командой «Принять» открывается окно «Параметры расчета 1», в котором задаются: количество знаков после запятой (для параметра количество знаков будет на 1 больше), количество карманов до 20.

14. В окне «Параметры расчета 2», перейдя на русский «RU» с использованием запятой, задаются верхние пределы фракций. Чтобы обеспечить читаемый масштаб оси содержаний кривых контрастности и обогащаемости последнее значение должно быть кратно 1, 2 или 5. Недопустимо отсутствие кусков в первом кармане.

15. Командой «Далее» открываются для просмотра все информационные окна, сдвигая перекрывающиеся вниз. Первое окно – «Гистограмма» показывает распределение количества кусков (интервалов) по заданным карманам. При появлении иконки об ошибке, последняя закрывается и, возвращаясь в обратном порядке, находится и исправляется допущенная некорректность. Гистограмма может быть распечатана только в жестком формате. Подобные гистограммы дифференциальных распределений следует строить с помощью подпрограммы **Excel** «Анализ данных» в «Сервисе».

16. Под гистограммой открывается «Результат» – таблица фракционного состава и технологических показателей. Таблица может быть

рассчитана для других карманов путем изменения значений пределов карманов, возвратом в окна «Параметры расчета 1 и 2» с изменением количества и значений верхних пределов карманов. Окончательный вариант таблицы переводится на лист Excel установкой точки в окошке «отдельный файл» и командой «записать в Excel».

17. Таблица в Excel-файле без нарушения ее структуры идентифицируется, сохраняется под заданным именем и сворачивается.

18. В окне «Результат» командой «построить график» открываются кривые контрастности в традиционном виде или с кривой ξ (установкой точки – «открыть график № 4»). Обозначения кривых перемещаются номером в окошке.

19. Графики сохраняются в формате **.bmp** (это расширение следует записать в имени файла) и направляются на рабочий стол, где могут быть распечатаны. Из закрытого состояния они копируются через буфер в **Word**, где обрабатываются графической подпрограммой с уменьшением яркости сетки путем регулировки света и контрастности.

20. Расчеты другой таблицы с того же исходного файла производятся после последовательного закрытия окон до окна «Программа», из которого через «Файл – открыть исходные данные» задаются новые столбцы расчета. Все операции по п.п. 2...8 повторяются. Перед тем как дать команду «записать в Excel» переставляется точка в «один файл». В этом случае запись производится в единый свернутый файл Excel, что проверяется при развороте. Таблица идентифицируется, сохраняется и сворачивается.

21. По окончании расчетов таблицы по отдельности копируются в **Word**, где выделяются в пределах контура таблицы с помощью правой клавиши мыши и через «автоподбор» форматируются «по содержанию», после чего они освобождаются от взаимного влияния и искажений.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 1

Фракционный состав выборки 100 кусков класса крупности -50+25 мм по содержанию Mn и предельные показатели интегрального распределения. M=0,48

Фракционный состав по содержанию Mn, %					Предельные показатели распределения						
№ фр.	Верхний предел, λ _{Mn} , %	Выход, γ _{фр} , %	Содержание, C _{Mn} , %	Извлечение, ε _{фр} , %	Хвосты				Концентрат		
					Выход, γ _{хв} , %	Содержание, θ _{Mn} , %	Извлечение, ε _{хв} , %	τ	Выход, γ _к , %	Содержание, β _{Mn} , %	Извлечение, ε _к , %
1	1,0	21,80	0,51	1,30	21,80	0,51	1,30	22,4	78,20	10,71	98,70
2	2,0	2,03	1,16	0,28	23,83	0,56	1,58	16,8	76,17	10,97	98,42
3	5,0	1,07	4,66	0,59	24,90	0,74	2,16	15,1	75,10	11,06	97,84
4	6,0	2,12	5,57	1,39	27,02	1,12	3,55	11,5	72,98	11,21	96,45
5	7,0	0,66	7,00	0,55	27,68	1,26	4,10	6,8	72,32	11,25	95,90
6	8,0	2,10	7,55	1,87	29,78	1,70	5,97	5,0	70,22	11,36	94,03
7	9,0	10,99	8,63	11,17	40,77	3,57	17,14	2,4	59,23	11,87	82,86
8	10,0	8,76	9,69	10,00	49,53	4,65	27,15	1,8	50,47	12,25	72,85
9	11,0	9,20	10,56	11,45	58,73	5,58	38,60	1,5	41,27	12,63	61,40
10	12,0	12,25	11,43	16,50	70,99	6,59	55,09	1,3	29,01	13,14	44,91
11	14,0	24,64	12,87	37,37	95,63	8,21	92,47	1,03	4,37	14,62	7,53
12	20,0	4,37	14,62	7,53	100,0	8,49=α	100,0	1,0			

Таблица 2

Фракционный состав выборки 100 кусков класса крупности -50+25 мм по содержанию Mn и показатели распределения для Fe

Фракционный состав по содержанию Mn, %					Предельные показатели распределения					
№ фр.	Верхний предел, λ _{Mn} , %	Выход, γ _{фр} , %	Содержание, C _{Fe} , %	Извлечение, ε _{фр} , %	Хвосты			Концентрат		
					Выход, γ _{хв} , %	Содержание, θ _{Fe} , %	Извлечение, ε _{хв} , %	Выход, γ _к , %	Содержание, β _{Fe} , %	Извлечение, ε _к , %
1	0,5	13,41	3,95	3,77	13,41	3,95	3,77	86,59	15,61	96,23
2	1,0	8,39	6,06	3,62	21,8	4,76	7,39	78,2	16,63	92,61
3	2,0	2,03	6,8	0,98	23,83	4,94	8,37	76,17	16,9	91,63
4	5,0	1,07	11,4	0,87	24,9	5,21	9,24	75,1	16,98	90,76
5	7,0	2,78	13,19	2,61	27,68	6,01	11,85	72,32	17,12	88,15
6	8,0	2,10	13,79	2,06	29,78	6,56	13,91	70,22	17,22	86,09
7	9,0	10,99	15,39	12,04	40,77	8,94	25,95	59,23	17,56	74,05
8	10,0	8,76	19,29	12,03	49,53	10,77	37,98	50,47	17,26	62,02
9	11,0	9,20	16,27	10,66	58,73	11,63	48,64	41,27	17,48	51,36
10	12,0	12,25	18,33	15,99	70,99	12,79	64,62	29,01	17,13	35,38
11	14,0	24,64	17,05	29,9	95,63	13,89	94,52	4,37	17,58	5,48
12	20,0	4,37	17,58	5,48	100	14,05	100			

Таблица 3

Фракционный состав выборки 100 кусков класса крупности -50+25 мм по параметру η_{Mn} (АПР) и показатели разделения метода на пробе железомарганцевой руды. $\Pi=0,45$

Фракционный состав по η					Показатели разделения					
№ фр.	Верхний предел, η_{Mn}	Выход, $\gamma_{фр}$, %	Содержание, C_{Mn} , %	Извлечение, $\epsilon_{фр}$, %	Хвосты			Концентрат		
					Выход, $\gamma_{хв}$, %	Содержание, θ_{Mn} , %	Извлечение, $\epsilon_{хв}$, %	Выход, $\gamma_{к}$, %	Содержание, β_{Mn} , %	Извлечение, $\epsilon_{к}$, %
1	0,05	22,50	0,53	1,41	22,50	0,53	1,41	77,50	10,80	98,59
2	0,08	1,33	1,05	0,17	23,83	0,56	1,58	76,17	10,97	98,42
3	0,10	1,24	7,86	1,15	25,07	0,92	2,73	74,93	11,02	97,27
4	0,14	2,64	7,87	2,45	27,71	1,59	5,18	72,29	11,13	94,82
5	0,15	3,62	9,87	4,21	31,34	2,54	9,39	68,66	11,20	90,61
6	0,16	0,97	12,50	1,42	32,31	2,84	10,81	67,69	11,18	89,19
7	0,18	4,23	10,01	4,99	36,53	3,67	15,80	63,47	11,26	84,20
8	0,20	5,79	10,01	6,83	42,32	4,54	22,64	57,68	11,38	77,36
9	0,22	7,55	9,79	8,70	49,87	5,33	31,34	50,13	11,62	68,66
10	0,26	11,98	11,08	15,63	61,85	6,45	46,97	38,15	11,80	53,03
11	0,30	21,83	11,42	29,38	83,67	7,74	76,35	16,33	12,29	23,65
12	>0,3	16,33	12,29	23,65	100,0	8,49	100,0			

Таблица 4

Фракционный состав выборки 100 кусков класса крупности -50+25 мм по параметру η_{Mn} на сепараторе СРФ2-100 и технологические показатели разделения. $\Pi=0,43$

Фракционный состав по η_{Mn}					Технологические показатели						
№ фр.	Верхний предел, η_{Mn}	Выход, $\gamma_{фр}$, %	Содержание, Mn , %	Извлечение, $\epsilon_{фр}$, %	Хвосты				Концентрат		
					Выход, $\gamma_{хв}$, %	Содержание, θ_{Mn} , %	Извлечение, $\epsilon_{хв}$, %	τ	Выход, $\gamma_{к}$, %	Содержание, β_{Mn} , %	Извлечение, $\epsilon_{к}$, %
1	0,15	13,14	0,48	0,75	13,14	0,48	0,75	17,5	86,86	9,70	99,25
2	0,20	7,20	0,50	0,42	20,34	0,49	1,17	17,4	79,66	10,53	98,83
3	0,30	1,46	0,76	0,13	21,80	0,51	1,30	16,8	78,20	10,71	98,70
4	0,33	3,82	7,41	3,34	25,62	1,54	4,64	5,5	74,38	10,88	95,36
5	0,35	3,46	6,38	2,60	29,08	2,11	7,24	4,0	70,92	11,10	92,76
6	0,40	0,9	9,91	12,72	39,97	4,24	19,95	2,0	60,03	11,32	80,05
7	0,45	17,83	10,78	22,65	57,81	6,25	42,60	1,4	42,19	11,55	57,40
8	0,50	22,98	11,12	30,09	80,79	7,64	72,70	1,1	19,21	12,06	27,30
9	0,55	14,25	12,23	20,54	95,04	8,33	93,24	1,02	4,96	11,57	6,76
10	>0,55	4,96	11,57	6,76	100,0	8,49	100,0	1,0			

Подписано в печать 10.10.2018 г.
Формат 60×90 /16. Усл. печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 16.

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС.
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31. Тел. (495) 9503180
Отпечатано на ризографе в РИС ВИМС.