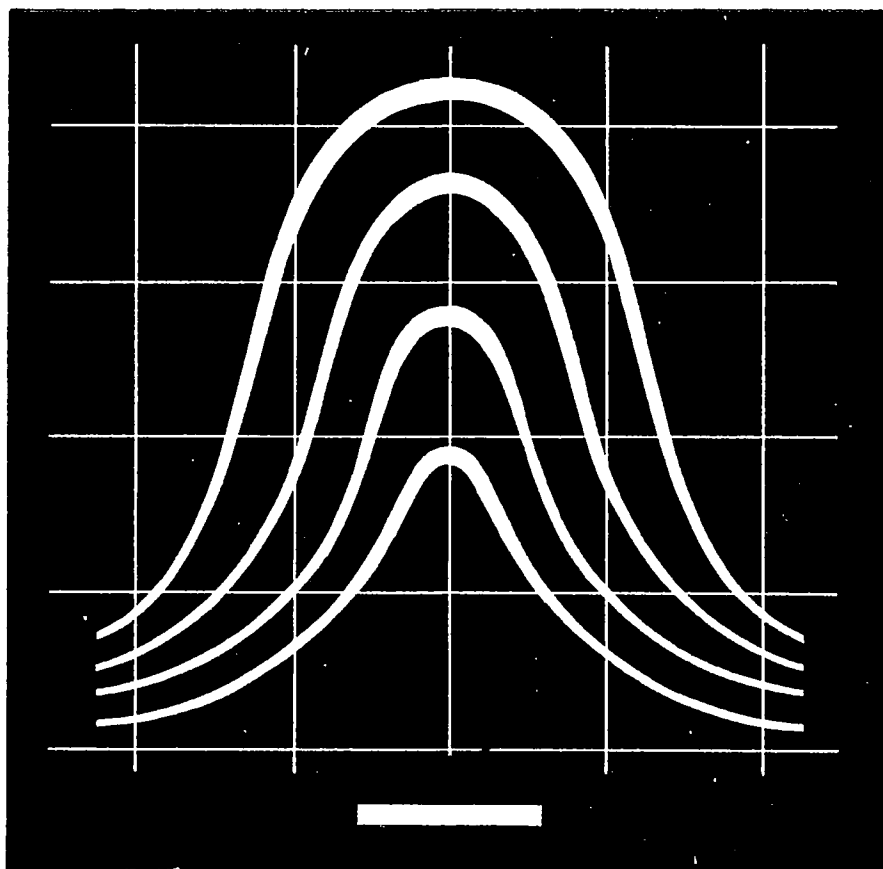


А. П. ТАТАРНИКОВ

ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ



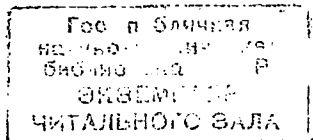
АТОМИЗДАТ - 1974

А. П. ТАТАРНИКОВ

ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ



МОСКВА АТОМИЗДАТ 1974



21
 27672

Ж-18803

Татарников А. П. Ядернофизические методы обогащения полезных ископаемых. М., Атомиздат, 1974, 144 с.

В книге рассмотрены быстро развивающиеся в последние годы ядернофизические методы обогащения полезных ископаемых.

Кратко изложены физические основы новых способов переработки сырья. Предложена их классификация. Основное внимание уделено вопросам теории и технологии методов, проанализированы основные факторы, определяющие эффективность сепарации руд. Рассмотрены особенности аппаратуры для обогащения руд и принципиальная схема переработки рудного сырья ядернофизическими методами. Подробно описаны некоторые из новых методов сепарации (гамма-абсорбционный, гамма-нейтронный, нейтронноактивационный и др.). Кратко изложены вопросы радиационной безопасности работ.

Таблиц 46. Иллюстраций 46. Библиография — 99 названий.

Т $\frac{30706-047}{034(01)-74}$ 47-74

© Атомиздат, 1974

Александр Прохорович Татарников

ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Редактор Т. А. Солдатенкова

Художественный редактор А. Т. Кирьянов

Художник А. И. Шавард

Технический редактор С. В. Долгополова

Корректор О. Р. Харламова

Сдано в набор 28/1 1974 г. Подписано к печати 9/IV 1974 г. Т-03192 Формат 60×90¹/₁₆
 Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 9,0 Уч.-изд. л. 9,34 Тираж 1400 экз. Цена 93 коп.

Зак. изд. 69307 Зак. тип. 785

Атомиздат, 103031, Москва, К-31, ул. Жданова, 5/7.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ядернофизические методы сепарации, основанные на использовании внешних источников ионизирующих излучений, относятся к наиболее молодым методам обогащения полезных ископаемых. Начало их развития можно отнести к 50-м годам, а впервые применили их в 60-х годах. Возникновение и развитие этих методов во многом связано с достижениями ядерной физики и электроники.

Степень развития отдельных методов неодинакова. Некоторые из них уже применяются в промышленности, другие близки к внедрению, третьи находятся в стадии лабораторных или теоретических исследований. В настоящее время уже накоплен определенный опыт в разработке и применении новых методов сепарации сырья. Частично он отражен во многих статьях, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе. Однако разбросанность, иногда малая доступность литературных сведений и их неполнота — с одной стороны, и перспективность этих методов — с другой, предопределяют необходимость обобщения имеющихся материалов и более полной разработки теории и технологии рассматриваемых способов сепарации. Данная работа — первая попытка в этом направлении.

Общую физическую основу ядернофизических методов составляют разделы ядерной физики, изучающие свойства атомов и их ядер, радиоактивность, виды и свойства излучений и их источников, взаимодействие излучений с веществом, ядерные реакции, регистрацию ионизирующих излучений и т. п. Эти вопросы широко освещены в литературе [1, 18, 25, 41, 43, 51, 56, 58, 69, 72, 80] и поэтому в данной книге не рассматриваются.

В гл. 1 изложены отдельные вопросы теории и элементы аппаратуры, общие для всех ядернофизических методов. В следующей главе главное внимание уделено физическим основам и вопросам применения наиболее развитых методов для сепарации различных полезных ископаемых. В гл. 3 описаны элементы технологии новых методов сепарации и некоторые дру-

гие вопросы. В специальный, хотя и короткий раздел (гл. 4) выделены вопросы радиационной безопасности работ.

Автор выражает искреннюю благодарность Г. А. Ковде и В. А. Мокроусову за ценные замечания по структуре и содержанию книги; С. Г. Троицкому, М. Л. Скриниченко и другим специалистам за критические замечания и предложения по рукописи, большинство из которых учтено автором, а также товарищам по работе за помощь в оформлении рукописи. Естественно, что в данной обобщающей работе неизбежны определенные недоработки и недостатки. Автор с благодарностью примет критические замечания и пожелания.

Характерные черты всех ядернофизических методов обогащения полезных ископаемых — облучение сырья с помощью внешних источников ионизирующего излучения и разделение облученного минерального сырья на продукты с различным содержанием полезного компонента по интенсивности проявления одного из эффектов, возникающих при взаимодействии излучений с веществом кусков руды.

Сложность вещественного состава сырья, многообразие видов излучений и их свойства, а также их взаимодействий с веществом, предопределяют принципиальную возможность появления большого числа ядернофизических методов сепарации минерального сырья.

По своей природе эти методы обогащения полезных ископаемых предназначены для сепарации кускового материала. Уже это обстоятельство во многом определяет место новых методов в общей технологической схеме. Они применяются на первых этапах переработки добытого из недр сырья, когда оно еще не прошло стадию измельчения.

Такая особенность рассматриваемых методов имеет свои преимущества и недостатки. Последние заключаются в том, что в кусковом материале не может быть достигнута высокая степень раскрытия минералов, а следовательно, и высокая степень обогащения полезных ископаемых. Однако этот недостаток во многих случаях компенсируется тем, что применение ядернофизических методов позволяет удалять в отвал значительное количество пустой породы (до 50—90% от сортируемых классов) без операции измельчения и других дорогостоящих процессов переработки руд. Одновременно с этим повышается содержание полезного компонента в рудах на самой первой стадии их обогащения. В некоторых случаях в концентрате, полученном в результате сепарации руд, уменьшается содержание компонентов, снижающих эффективность его переработки на последующих этапах.

В результате этого обеспечивается высокая технологическая и экономическая эффективность новых способов сепарации сырья.

В общем виде сущность процесса сепарации минерального сырья ядернофизическими методами заключается в следующем. Рудные куски определенного класса крупности облучаются или просвечиваются в движении каким-либо излучением, испускаемым источником. При взаимодействии с веществом кусков руды частицы поглощаются или рассеиваются. Поглощение частиц может происходить в результате различных эффектов, например, фотоэффекта и эффекта образования пар для γ -квантов, ядерных реакций и др. Ядерные реакции обычно сопровождаются испусканием каких-либо частиц и часто приводят к образованию радиоактивных изотопов, испускающих β -, γ - или нейтронное излучение. В результате рассеяния частиц в веществе направление их движения изменяется с соответствующей потерей энергии, а в некоторых случаях происходят ядерные реакции, например, типа (n, n') и (γ, γ') . Рассеянное излучение может также частично поглощаться внутри кусков руды. В результате процессов поглощения и рассеяния первичный поток частиц ослабляется.

Некоторые из отмеченных эффектов в конкретных условиях могут оказаться определяющими и к тому же непосредственно связанными с каким-либо компонентом (химическим элементом, минералом и т. п.), находящимся в данном минеральном сырье. В этом случае, регистрируя с помощью электронной аппаратуры интенсивность проявления такого эффекта, можно тем самым определить наличие компонента в каждом из кусков руды. Добавляя в схему электронной аппаратуры специальный логический блок, можно из кусков руды выделить те, при прохождении которых через зону облучения поток регистрируемого излучения (в первом приближении пропорционального относительно содержанию определяемого компонента в кусках руды) оказывается выше (или ниже) некоторого наперед заданного уровня. Затем эти куски при помощи специального разделяющего устройства (шибера, пневмоклапана и т. п.), управляемого радиометром, выделяются из общего рудного потока. В итоге руда, подвергаемая облучению, разделяется на продукты с различным (в том числе отвальным) содержанием полезного компонента.

В целом последовательность операций, необходимых для реализации ядернофизических методов сепарации, состоит из этапов: подготовки руды к обогащению, подачи на облучение, облучения руды, регистрации излучения и разделения руды на продукты обогащения. Не вдаваясь в анализ всей схемы обогащения сырья, отметим, что основными, определяющими являются операции облучения и регистрации излучения. Эти операции, представляющие по существу экспресс-опробование отдельных кусков руды, перемещающихся относительно источников и детекторов излучения, во многом определяют эффективность сепарации минерального сырья.

В ядерной геофизике при проведении анализов и экспресс-опробования проб и рудного материала [40, 43, 56, 64, 72, 75, 79, 80] точность определений оказывается высокой и погрешности обычно находятся в пределах нескольких процентов. Этому во многом способствуют специально создаваемые благоприятные условия проведения анализов и определений.

К их числу относятся постоянные геометрические условия облучения проб и измерения потоков излучения, что достигается путем подготовки проб одинаковых размеров (навесок) и формы, постоянством расстояний источник — проба и проба — детектор излучений. При этом особое внимание уделяется обеспечению минимально возможного расстояния между пробой, источником и детектором. Высокая точность анализов во многих случаях обеспечивается относительно длительными облучением или измерением излучения проб (до 10—20 мин). Влияние неравномерности распределения полезного компонента значительно уменьшается (или исключается вообще) в результате предварительного измельчения пробы и тщательного перемешивания порошкообразного материала.

В полной мере все эти условия совершенно невыполнимы при облучении и регистрации излучения в процессе сепарации кусков руды. Это связано с тем, что сепарации подвергаются куски различных размеров и формы (а следовательно, и массы), хотя и ограниченных в определенных пределах. Так как облучение и регистрация излучения производятся в процессе движения кусков руды, то практически невозможно обеспечить длительное (более секунды) время облучения и регистрации, а также сохранить постоянными расстояния источник — кусок и кусок — детектор. Как следствие этих и других обстоятельств точность и достоверность экспресс-опробования отдельных кусков руды, осуществляемых в процессе сепарации, оказываются значительно более низкими, чем на соответствующие элементы в аналитической практике. Погрешность в оценке содержания полезного компонента в кусках руды может в данных условиях достигать 25—50% и более, что в определенной мере сказывается на эффективности сепарации сырья. В связи с этим необходима специальная разработка вопросов экспресс-опробования кусков руды как неотъемлемой части процесса сепарации полезных ископаемых ядернофизическими методами. Это позволит существенно уменьшить возможный уровень погрешностей в оценке содержания полезного компонента в рудных кусках.

Первые исследования по оценке перспектив некоторых из рассматриваемых методов проведены в Советском Союзе и США в конце сороковых — первой половине пятидесятых годов. В результате этого были установлены принципиальные возможности нейтронноактивационного, фотонейтронного, γ -абсорбционного способов обогащения руд. Новый этап в раз-

витии ядернофизических методов начался с 60-х годов, когда был сделан переход от общих теоретических исследований к инженерной разработке отдельных методов. Это позволило применить фотонейтронный и гамма-абсорбционный методы в промышленности и приблизиться к внедрению ряда других. Оценка возможностей показывает, что в будущем использование ядернофизических методов сепарации для обогащения руд черных, цветных и редких металлов, углей, а также других видов минерального сырья может быть значительно расширено [8, 34, 50, 59, 64, 68, 90, 91, 97, 99].

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- D — количество радиоактивного или полезного компонента, $г$;
 D_0 — порог чувствительности сепаратора, $г$;
 E — энергия частиц, $Мэв$ (индексы α, β, γ, n обозначают соответственно α - и β -частицы, γ -кванты, нейтроны);
 F', F'_n, F'_ϕ — среднее число импульсов за время регистрации в том случае, если кусок находится в покое относительно датчика (соответственно общее, от воздействия полезного компонента и фона);
 F, F_n — то же для случая перемещения куска относительно детектора излучения;
 G, G_n, G_m — выход частиц (соответственно общий, от полезного и мешающего компонентов), $частица/сек$;
 I_0, I — первоначальная и конечная плотности потока частиц, $частица/(сек \cdot см^2)$;
 N_0, N — количества атомов, соответствующие начальному и конечному моментам заданного интервала времени;
 P — вероятность события;
 Q_c, Q_p — чувствительность сепараторов, соответственно статическая и рабочая;
 $S_{\text{к}}$ — эффективное сечение (площадь) куска, $см^2$;
 T — период полураспада;
 W, W_n, W_m — количество частиц за заданное время (соответственно общее, от полезного и мешающего компонентов);
 a — активность изотопа, $расп/сек$;
 d — средний размер (диаметр) куска, $мм$ или $см$;
 f — средняя скорость счета импульсов, $сек^{-1}$;
 p_i — доля (количество) какого-либо компонента в общей массе руды, рудного куска; % или $г$;
 q — масса куска, $г$;
 t_0, t_n, t_o — продолжительность облучения, выдержки и регистрации, $сек$;
 v — скорость перемещения куска руды, $см/сек$;
 Δ, Δ_0 — разрешающая способность и порог разрешающей способности сепаратора, %;
 Π — величина, характеризующая источник излучения и в зависимости от условий, выражаемая в $г\text{-экв Ra}$; $частица/сек$; $частица/(сек \cdot см^2)$; $мка$; $квт$ и т. п.;
 Σ — макросечения взаимодействия, $см^{-1}$ (индексы a, s , «акт» обозначают соответственно поглощение, рассеяние, активацию);
 Φ_0, Φ — первоначальный и конечный потоки частиц, $частица/см^2$;
 α, β — содержания полезного компонента соответственно в руде (куске) и в отдельных классах, фракциях, %;
 μ — линейный коэффициент поглощения излучения, $см^{-1}$;
 $\gamma = 0,693$ (коэффициент в выражении $e^{-0,693 t/T}$);
 ρ — плотность руды, $г/см^3$;
 σ — эффективное сечение взаимодействия (микросечение), $барн$ ($1 \text{ барн} = 1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$);

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТЫ АППАРАТУРЫ

1. ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В применении к ядернофизическим методам сепарации понизирющие излучения можно условно разделить на сильно- (нейтроны, γ -кванты), средне- (β -частицы) и слабопроникающие (α -частицы, протоны, дейтоны и др.). При сепарации рудного сырья наиболее часто используют нейтронное и γ -излучения, значительно реже — β -излучение.

При оценке возможностей применения различных излучений необходимо наряду с их проникающей способностью учитывать и другие факторы: размеры кусков руды, характер распределения в них определяемого компонента, эффективность используемых детекторов излучения, уровень фона, вид корреляционной зависимости между регистрируемым признаком и содержанием компонента. Все эти вместе взятые факторы определяют точность экспресс-опробования, проводимого в процессе сепарации сырья. Если необходимая точность обеспечивается, что является главным условием эффективного проведения любого процесса сепарации, то результаты обогащения будут положительными независимо от вида используемых излучений. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

Существующие способы опробования минерального сырья предполагают отбор рудных проб (частных совокупностей), представляющих собой всю генеральную совокупность (исходную руду). При этом обычно помимо способа отборки проб определяющим является не доля сырья, отбираемая в пробу от его общего количества, а само количество (масса) пробы. Это предусматривается формулой Чечотта и статистическими методами [26, 75].

При сепарации руд экспресс-опробованию подвергают отдельные куски руды, находящиеся в движении. При этом каждый кусок должен анализироваться как единое целое без его разрушения. Фактически в зависимости от соотношения размеров куска и длины пробега частиц в веществе информацию о содержании полезного компонента или вещественном составе можно получить от всего объема куска или только от его некоторой части. В последнем случае достоверность анализа куска как единого целого будет определяться тем, на-

сколько свойства проанализированной части куска соответствуют свойствам всего куска руды.

Из табл. 1.1 следует, что проникающая способность излучений, характеризующаяся максимальным пробегом в алюминии, изменяется в широких пределах. При одинаковой энергии излучений различие достигает 4—5 порядков.

Таблица 1.1

Максимальная длина пробега различных частиц в алюминии, мм

Энергия, Мэв	γ -Кванты (потери 90 % квантов)	Электроны. позитроны	Протоны	α -Частицы
0,050	24	0,011	—	—
0,10	59	0,045	—	—
0,50	111	0,63	0,005	—
1,00	135	1,6	0,013	—
2,00	194	3,5	0,043	—
3,0	243	5,8	0,078	0,008
5,0	295	9,9	0,196	0,017
7,0	328	14,2	—	0,028
10,0	370	21,6	—	0,048

При сепарации сырья ядернофизическими методами объем исследуемой части каждого из кусков во многом зависит от характеристик первичного и регистрируемого излучений, виды которых могут совпадать или отличаться друг от друга. При этом анализируемая часть куска в основном определяется менее проникающим излучением. В частности (табл. 1.2), при использовании протонов (или α -частиц) как первичного или регистрируемого излучений анализируемая доля кусков незначительна и заметна лишь при крупности менее 10 (2) мм. При использовании β -частиц анализируемая доля существенно увеличивается и при крупности от 50 (10) мм и менее составляет 100% общего объема каждого из кусков. γ -Излучение просвечивает практически весь объем кусков мельче 200 мм.

Используя различные виды частиц для облучения или регистрации, можно как бы изменять исследуемую часть объема одних и тех же кусков руды. В зависимости от вида и энергии излучения, а также размеров куска эта часть может изменяться от долей процента до 100%. Из теории опробования [26, 75] известно, что этот формальный показатель (если он менее 100%) может быть достаточным, если опробуемая часть куска (частная проба) по своим свойствам соответствует всему куску (генеральной совокупности). Следовательно, решающей в итоге оказывается не проникающая способность излучения, а степень соответствия физических свойств исследованной части куска всему объему образца. Степень этого соответствия зависит от характера распределения полезного компонента в пределах рудных кусков, текстурных и структурных особенно-

Анализируемая доля объема кусков* руды (% общего объема) при использовании различных излучений

Характеристика кусков руды, мм	Энергия частицы, Мэв													
	γ-Кванты					β-Частицы					Протоны		α-Частицы	
	Средний диаметр	Средняя толщина	0,1	1,0	10,0	2,0	5,0	10,0	2,0	5,0	2,0	5,0	5,0	10,0
-200+100	150	90	66	100	100	3,9	11	24	0,05	0,2	0,05	0,02	0,05	
-100+50	75	45	100	100	100	7,8	22	48	0,10	0,4	0,10	0,04	0,11	
-50+20	35	21	100	100	100	16,8	47	100	0,2	0,9	0,2	0,08	0,23	
-20+10	15	9	100	100	100	39	100	100	0,5	2,2	0,5	0,19	0,53	
-10+5	7,5	4,5	100	100	100	78	100	100	1,0	4,3	1,0	0,38	1,1	
-5+2	3,5	2,1	100	100	100	100	100	100	2,0	9,3	2,0	0,81	2,3	
-2+1	1,5	0,9	100	100	100	100	100	100	4,8	21,7	4,8	1,9	5,3	
-1+0,5	0,75	0,45	100	100	100	100	100	100	9,6	43,5	9,6	3,8	10,6	
-0,5+0,2	0,35	0,21	100	100	100	100	100	100	20,5	93	20,5	8,1	23	
-0,2+0,1	0,15	0,09	100	100	100	100	100	100	48	100	48	19	53	

* Кусок представлен параллелепипедом эквивалентного объема.

стей руды и т. д. [30]. Для конкретных видов сырья и излучений ее определяют экспериментально, облучая куски и регистрируя излучения в условиях, близких к условиям сортировочных машин, а также проводя анализ исследованных кусков, устанавливая вид корреляционной связи между интенсивностью проявления регистрируемого признака и средним содержанием полезного компонента в кусках руды. При тесной корреляционной связи сепарацию минерального сырья принципиально можно осуществить, даже если для облучения или регистрации использовать слабопроникающее излучение (например, α -излучение). В практике обогащения с успехом используют световое излучение (фотометрические методы сепарации сырья) [77], характеризующееся крайне незначительной проникающей способностью. Этому в отдельных случаях способствует наличие четкой корреляционной зависимости между цветом кусков и их вещественным составом.

Изложенное показывает, что и при обогащении руд ядернофизическими методами принципиально могут быть использованы не только γ -излучение и нейтроны, но и менее проникающие частицы, такие, как β -частицы и ускоренные электроны, протоны и даже α -частицы. При этом в каждом конкретном случае необходимо учитывать индивидуальные особенности частиц и с учетом свойств руды разрабатывать комплекс условий, обеспечивающий успешное проведение процесса сепарации. Следует иметь в виду, что если возможность использования β -излучения при ядернофизических методах сепарации уже подтверждена отдельными работами, например [34, 88], то конкретные исследования по оценке применимости менее проникающих частиц еще не проводились. При использовании протонов и α -частиц на результаты сепарации существенное влияние (больше, чем при использовании сильнопроникающего излучения) будут оказывать качество промывки сортируемого сырья, стабильность расстояния источник — образец и образец — детектор, поглощение излучения в воздухе и т. п.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СЕПАРАЦИИ

Разнообразие различных видов излучений и процессов их взаимодействия с веществом сложного состава, каким обычно является минеральное сырье, предопределяет многообразие ядернофизических методов, которые могут быть использованы для обогащения полезных ископаемых. Например, в ядерной геофизике известно около 90 методов для определения различных компонентов в рудах и породах [73]. В области обогащения полезных ископаемых уже в настоящее время известно около 10 различных методов, основанных на применении источников внешнего излучения, и число таких методов увеличи-

вается. В связи с этим возникает необходимость их систематизации. Это позволит более правильно оценить перспективы развития и возможности новых методов, их взаимосвязь и выявить направления для первоочередной разработки и внедрения в промышленность.

Наиболее полная классификация ядернофизических методов в применении к определению состава горных пород и руд дана в работе [73]. Одна из первых попыток систематизации ядернофизических методов обогащения полезных ископаемых отражена в работе [34].

Возможность применения различных излучений в сепарации сырья недостаточно изучена, поэтому в настоящее время практически невозможно разработать полную классификацию ядернофизических методов обогащения полезных ископаемых. По-видимому, в такой классификации каждый способ должен характеризоваться комплексом условий, средств и приемов его реализаций с обязательным отражением физической сущности метода.

В первую очередь следует выделить основные группы, объединяющие методы, близкие по физическим процессам или эффектам, на которых они основаны, независимо от типа применяемых источников излучения. Из всего многообразия процессов взаимодействий излучений с веществом и сопровождающих их эффектов в настоящее время наибольшее значение при ядернофизических методах сепарации имеют: 1) ослабление потока первичного излучения при прохождении его через вещество; 2) рассеяние первичного излучения в веществе (на атомах и их ядрах) и другие близкие по внешнему проявлению процессы, например возникновение тормозного и характеристического излучений; 3) возникновение излучений, сопровождающих ядерные реакции (мгновенное излучение ядерных реакций); 4) образование в процессе ядерных реакций радиоактивных изотопов.

Соответственно можно рассматривать несколько групп ядернофизических методов сепарации полезных ископаемых (табл. 1.3). В пределах каждой такой группы выделяются методы и в случае необходимости — их разновидности, характеризующиеся некоторыми частными особенностями основного метода (энергия излучения и т. п.). Кроме того, в классификации даются возможные типы источников частиц, виды частиц и их энергия, характеристика используемых эффектов и регистрируемого излучения. Принципиально каждый из методов, за немногим исключением, может быть реализован в режиме непрерывного или импульсного облучения. В последней колонке табл. 1.3 символами Н и И обозначается наиболее предпочтительный режим для реализации данного метода.

Описываемый вариант — одна из первых попыток разработки развернутой классификации ядернофизических методов обогащения полезных ископаемых. В ней учтены методы, кото-

рые в той или иной степени развиты или даже нашли применение в промышленности. В то же время в нее включен ряд методов, пока не разрабатываемых, но имеющих физические и технические предпосылки. Классификация требует дальнейшего совершенствования как путем уточнения систематизации методов, так и их характеристик.

Ниже даются отличительные особенности выделенных групп ядернофизических методов обогащения полезных ископаемых.

Абсорбционные методы. Для этой группы методов характерно разделение кусков руды по ослабленному ими потоку первичного излучения. В отличие от других при абсорбционных методах сепарации виды бомбардирующего и регистрируемого излучений всегда совпадают.

В настоящее время наиболее известны абсорбционные методы сепарации полезных ископаемых, основанные на облучении сырья γ -квантами. Принципиально сепарацию некоторых видов полезных ископаемых можно проводить и по кратности ослабления потоков других частиц (например, нейтронов, β -частиц).

В конструкциях сепараторов, предназначенных для сортировки полезных ископаемых абсорбционными методами, надо учитывать специфические условия, обусловленные необходимостью осуществления практически совпадающих во времени двух операций: облучения кусков и регистрации ослабленного излучения. При этом источник излучения и детектор радиометра должны размещаться обязательно диаметрально противоположно друг другу по разным сторонам просвечиваемого потока рудных кусков.

Интенсивность регистрируемого излучения в этих методах определяется не только содержанием полезного компонента и плотностью вещества рудной массы, но и толщиной образцов, через которые проходит первичное облучение. Это обстоятельство требует применения специальных устройств, учитывающих толщину облучаемых образцов в процессе сепарации.

Методы, основанные на регистрации рассеянного и других излучений, возникающих при взаимодействии первичного излучения с атомами вещества. К этой группе в настоящее время отнесены методы, использующие регистрацию рассеянного β - или γ -излучений, а также разновидности рентгенорадиометрического метода, основанные на облучении руд β - или γ -излучением изотопных источников и регистрации возникающего при этом характеристического излучения отдельных химических элементов, содержащихся в руде.

В методах этой группы виды первичного и вторичного излучений не всегда совпадают. Кроме того, проникающая способность вторичного излучения в большинстве случаев более слабая, чем первичного. Так же как и при абсорбционных методах сепарации, конструкция сепараторов должна предусмат-

Классификация ядернофизических методов

обогащения полезных ископаемых

Группы	Метод	Характеристика регистрируемого излучения			Используемые эффекты		Характеристика регистрируемого излучения			Режим облучения (И — импульс- ный, Н — непре- рывный)
		Источники	Вид излу- чения	Энергия, Мэв	Промежуточные	Основные	Название	Вид	Энергия, Мэв	
I. Методы, основанные на ослаблении пучка первичного излучения (абсорбционные)	а) Элементный	Изотопные	γ	<0,3	—	Фотозффект	Ослабленное первичное	γ	<0,3	Н
	б) Плотностной	»	γ	>0,3	—	Комптон-эффект и эффект образования пар	То же	γ	Не выше энергии первичного излучения	Н
	Нейтронно-абсорбционный	Изотопные, ускорительные	n	Тепловые нейтроны	—	Ослабление пучка нейтронов в результате поглощения и рассеяния	»	n	Тепловые нейтроны	Н
II. Методы, основанные на регистрации рассеянного и других излучений, возникающих при взаимодействии первичного излучения с атомами вещества	β - β	Изотопные	β	0,6—3,0	—	Зависимость отраженного β -излучения от содержания тяжелых элементов в веществе	Ограженное и обратно-рассеянное β -излучение	β	<3,0	Н
	γ - γ	Изотопные	γ	>0,3	—	Рассеяние γ -квантов на атомах среды	Рассеянное γ -излучение	γ	Не выше энергии первичного излучения	Н
	β -Рентгеновский	»	β	До 1—3;	—	Возбуждение рентгеновского характеристического излучения под действием частиц или квантов	Характеристическое излучение	γ	<0,15	Н
	γ -Рентгеновский	»	γ	0,03—0,25	—	Реакция (α , n)	Нейтроны реакции (α , n), замедленные в парафине	n	Медленные нейтроны	Н
III. Методы, основанные на регистрации мгновенного излучения ядерных реакций	α -Нейтронный	»	α	Выше порога реакции (α , n)	—	Возникновение тормозного излучения β -частиц	Взаимодействие тормозного излучения с ядрами отдельных изотопов по реакции (γ , n) и др.	n	»	И, Н
	β -Нейтронный	Ускорительные, изотопные	β	Выше порога реакции (γ , n) и др.	—	Реакции (α , n), (α , p) и др.	Распад радиоактивных изотопов	n	»	И, Н
	γ -Нейтронный	То же	γ	То же	—	1) Образование тормозного излучения 2) Взаимодействие тормозного излучения с ядрами по реакциям (γ , n) и др.	То же	n	»	И, Н
IV. Методы, основанные на регистрации излучения искусственных радиоактивных ядер, возникших в результате реакций и взаимодействий (активационные)	α -Активационный	Изотопные	α	Выше порога реакций (α , n) и др.	—	Взаимодействие тормозного излучения с ядрами по реакции (γ , n) и др.	»	β γ	Различная	Н
	β -Активационный	Ускорительные	β	Выше порога реакций (γ , n) и др.	—	Реакции (n, γ), (n, α), (n, p) (n, f) и др.	»	β γ n	»	Н, И
	γ -Активационный	»	γ	То же	—	Адсорбция ионов на поверхности кусков	Излучение адсорбированных ионов	β γ	<3,0	Н
	Нейтронно-активационный	Изотопные, реакторные, ускорительные	n	Различная	—					
	Адсорбционно-активационный	Изотопные	Радиоактивные ионы	—						

ривать возможность практически одновременного проведения операций облучения кусков и регистрации вторичного излучения. При этом в геометрии системы источник — кусок — детектор должен обеспечиваться оптимальный для данных условий угол между пучками первичного и вторичного излучений.

К методам, основанным на регистрации мгновенного излучения ядерных реакций, отнесены γ -нейтронный, β -нейтронный, α -нейтронный. Принципиально для сепарации руд можно использовать методы, основанные и на других реакциях, например типа (n, γ) и т. п. Однако в связи с малой изученностью этого вопроса другие возможные методы, относящиеся к данной группе, в предлагаемую классификацию пока не включены. В методах данной группы, так же как в методах предыдущей, вторичное излучение регистрируется практически одновременно с облучением кусков руды и в присутствии первичного излучения. Однако почти во всех случаях первичное и вторичное излучения различны по своему виду. Кроме того, вторичное излучение (как правило, нейтроны или γ -кванты) обычно сильнопроникающее. В отличие от двух предыдущих групп в рассматриваемых методах в зависимости от конкретных условий геометрия системы источник — кусок — детектор может быть разнообразной.

Активационные методы. Активация кусков руды может происходить в результате практически любой ядерной реакции. Наиболее перспективны для этих целей реакции (n, γ) , (n, α) , (n, p) , (n, f) , (n, n') , (γ, n) , (γ, γ') . Общая характерная черта всех активационных методов сепарации сырья — возможность разделения во времени и пространстве процессов облучения и регистрации излучения кусков руды. Это создает возможность регистрации вторичного излучения в отсутствие первичного, что достигается размещением узлов облучения и регистрации на некотором расстоянии друг от друга и в случае необходимости установкой между ними экранов, поглощающих первичное излучение.

3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ

Технологические показатели сепарации рудного сырья ядернофизическими методами — итог сложного взаимодействия (последовательного и одновременного) многих факторов. В общем случае число актов взаимодействия и соответствующее число частиц, подлежащих регистрации, определяются: видом и энергией бомбардирующих частиц; величиной, формой и однородностью потоков первичного и вторичного излучений; вещественным составом кусков руды, в том числе содержанием полезного и мешающих компонентов и их распределением в пределах рудных кусков; размерами, формой и плотностью кусков руды; продолжительностью облучения и

продолжительностью выдержки, т. е. временем, прошедшим от окончания облучения до начала регистрации.

Источники излучений, применяемые для облучения руд, можно подразделить на три больших класса: изотопные, реакторные и ускорительные [31]. Среди изотопных источников (табл. П.1—П.6 приложения) выделяются источники α -, β - и γ -излучений и нейтронные. Последние подразделяют: 1) источники, основанные на реакции (α, n); 2) фотонейтронные источ-

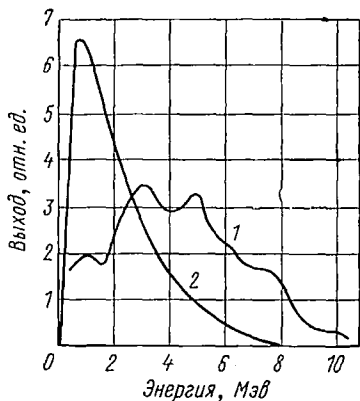


Рис. 1.1. Спектр нейтронов полоний-бериллиевого источника (1) и нейтронов деления U^{235} (2).

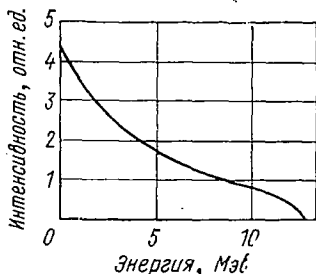


Рис. 1.2. Энергетический спектр тормозного излучения электронов.

ники, основанные на использовании реакции (γ, n), и 3) источники нейтронов спонтанного деления.

Основные реакторные источники — ядерные реакторы и нейтронные размножители. Плотность потока нейтронов изменяется в каналах быстрых нейтронов от 10^4 — 10^5 (в нейтронных размножителях) до 10^9 — 10^{10} нейтрон/(сек·см²) в реакторах, а в тепловых каналах достигает соответственно 10^6 — 10^8 и 10^{12} — 10^{15} нейтрон/(сек·см²). Все виды нейтронных источников, кроме фотонейтронных, испускают нейтроны широкого энергетического спектра (рис. 1.1). Максимальная энергия нейтронов может достигать 10—15 МэВ.

Для облучения руд можно также использовать генераторы нейтронов и ускорители электронов (линейные, микротроны и т. п.). В генераторах нейтронов используются реакции типа $H^2(d, n)He^3$; $H^3(d, n)He^4$ и др. В первой реакции возникают нейтроны с энергией примерно 2,5 МэВ, если дейтоны разгоняются до энергии 0,2 МэВ. Во второй реакции при энергии дейтонов 0,15 МэВ получаются нейтроны со средней энергией примерно 14 МэВ. Ускорители электронов (см. табл. П.7 приложения) — наиболее универсальные источники излучений: ускоренных электронов, тормозного излучения (рис. 1.2) и

нейтронов, мощность потоков которых и энергия частиц могут регулироваться в широких пределах.

Подробное описание конструкций и характеристик различных источников ионизирующих излучений можно найти в работах [9, 13, 15—18, 25, 36, 37, 41, 69, 72, 80]. Каждый источник создает поле излучения, представляющее собой пространственно-временное распределение излучения (частиц) в рассматриваемой среде. Условно можно выделить следующие виды (формы) полей излучений: шаровые, конусные, лучевые и реакторные.

Шаровая форма поля присуща изотопным источникам излучения, испускающим частицы изотропно. При точечном источнике излучения с выходом G частиц в секунду плотность потока частиц на расстоянии r от источника составит

$$I = G/4\pi r^2, \quad (1.1)$$

а доля частиц, испускаемых источником в телесном угле ω , равна

$$\eta = Gs/r^2, \quad (1.2)$$

где s — участок поверхности сферы с радиусом r , который виден из центра источника под углом ω .

Обычно при облучении сырья с помощью изотопных источников излучение в определенном телесном угле ω составляет не более 20—30% общего числа частиц (квантов), испускаемых источниками. При этом используемая часть поля излучения изотопных источников имеет конусную форму.

Конусная форма поля излучения характерна также для тормозного излучения ускорительных источников. Плотность потока частиц в поперечном сечении конусного поля излучения как правило неравномерна (рис. 1.3, а). Наибольшая плотность наблюдается вдоль оси пучка излучения; по мере удаления от оси она уменьшается. Одновременно плотность тока уменьшается при увеличении расстояния от источника (см. рис. 1.3, б).

Лучевая форма поля излучения наблюдается у некоторых источников частиц (пучок ускоренных электронов в ускорителях электронов; пучки, выводимые из реакторов, и т. п.). Она характеризуется практически параллельным распространением частиц вдоль оси и их равномерным распределением по поперечному сечению поля.

Своеобразна структура поля излучения, существующего внутри каналов ядерного реактора, где частицы могут перемещаться во всевозможных направлениях. В реакторном поле направление движения частиц принимается параллельным и однородным в любом направлении.

Таким образом, при любой форме поля излучения на рудные образцы воздействует определенный пучок частиц, т. е.

совокупность частиц, движущихся по близким траекториям. Если поле излучения имеет шаровую или конусную формы и используемое излучение неколлимировано, то образцы сырья облучаются расходящимся пучком частиц, угол расходимости которого, как правило, не превышает 0,2—0,3 полного телесного угла. В остальных случаях куски руды облучаются пучком частиц, траектория которых параллельна оси пучка. При рас-

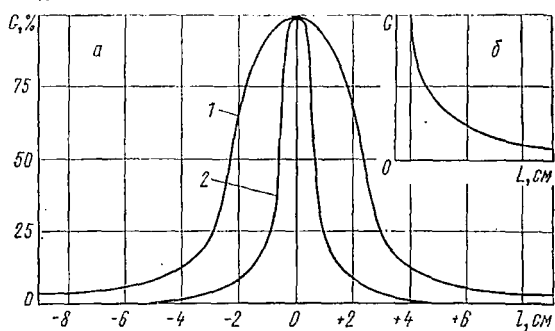


Рис. 1.3. Характеристика поля излучения:
a — вдоль траектории движения кусков руды; *б* — вдоль оси пучка; *L* — расстояние от источника; *l* — расстояние от оси пучка; *1* — широкий конус; *2* — узкий конус.

четах потоков частиц в большинстве случаев можно считать, что пучки состоят из частиц, движущихся параллельно оси пучка. В более точных расчетах с использованием конусных пучков излучения необходимо учитывать угол расхождения и изменение плотности потока частиц в пучке.

Каждый пучок излучения характеризуется формой, видом испускаемого излучения и его энергией, плотностью и равномерностью потока, а также стабильностью во времени. Пучки излучения могут быть моноэнергетическими или немоноэнергетическими. Различаются пучки непрерывного действия (пучки излучения, испускаемые изотопными, реакторными, некоторыми ускорительными и другими источниками) и импульсные (пучки, испускаемые ускорителями или реакторами импульсного действия). Последние характеризуются также длительностью импульсов и частотой их повторения.

Ниже рассматриваются общие условия облучения для всех методов, кроме абсорбционных. Некоторые из вопросов облучения руд и регистрации излучения при абсорбционных методах сепарации в связи с их специфичностью будут изложены в разд. 1 гл. 2.

При облучении кусков руды количество вновь возникающих или рассеиваемых в единицу времени частиц G_n (при конкретных постоянных условиях облучения) прямо пропорционально

количеству определяемого компонента D , находящегося в образце:

$$G_{\Pi} = KD, \quad (1.3)$$

где K — коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально для конкретных условий, *частица/(г·сек)*.

Взаимодействие частиц может происходить не только с полезным компонентом, но и с другими составляющими вещества рудного образца (p_1, p_2, \dots, p_n). В результате возникают побочные эффекты и излучения, которые будут создавать определенный вклад G_M в общее количество частиц, исходящих от образца:

$$G_M = \sum_{i=1}^{i=n} x_i p_i, \quad (1.4)$$

где x_i — соответствующий p_i коэффициент пропорциональности.

Тогда общее число частиц G , испускаемых образцом, будет

$$G = KD + \sum_{i=1}^{i=n} x_i p_i. \quad (1.5)$$

В число факторов, определяющих число исходящих от куска частиц, входит продолжительность облучения. По характеру влияния этого фактора на общее количество испускаемых частиц W все рассматриваемые методы можно разделить на две большие группы. В первую входят методы II и III групп, основанные на регистрации излучения, возникающего при взаимодействии излучения с атомами вещества, и мгновенного излучения ядерных реакций, во вторую — активационные методы. Если облучаемый образец находится в покое относительно источника излучения, то в первом случае наблюдается линейная зависимость между продолжительностью облучения t_0 и величиной W_{Π} , так как регистрируемое излучение наблюдается только в момент облучения

$$W_{\Pi} = KDt_0. \quad (1.6)$$

Соответственно

$$W_M = \left(\sum_{i=1}^{i=n} x_i p_i \right) t_0; \quad (1.7)$$

$$W = \left(KD + \sum_{i=1}^{i=n} x_i p_i \right) t_0. \quad (1.8)$$

При активационных методах обогащения зависимость величины W от времени облучения оказывается более сложной:

$$W_{\Pi} = KD [1 - \exp(-\lambda t_0/T)]; \quad (1.9)$$

$$W_M = \sum_{i=1}^{i=n} \{x_i p_i [1 - \exp(-vt_0/T_i)]\}, \quad (1.10)$$

или с учетом времени выдержки

$$W_n = KD [1 - \exp(-vt_0/T)] \exp(-vt_n/T); \quad (1.11)$$

$$W_M = \sum_{i=1}^{i=n} [x_i p_i [1 - \exp(-vt_0/T_i)] \exp(-vt_n/T_i)]. \quad (1.12)$$

Нетрудно показать, что при $t_0 \ll T$ и $t_n \ll T$ уравнения (1.9) — (1.12) приводятся соответственно к уравнениям вида (1.6), (1.7).

Из-за различий в характере исследуемых зависимостей для двух групп методов более подробный анализ условий облучения по каждому из направлений проведен отдельно.

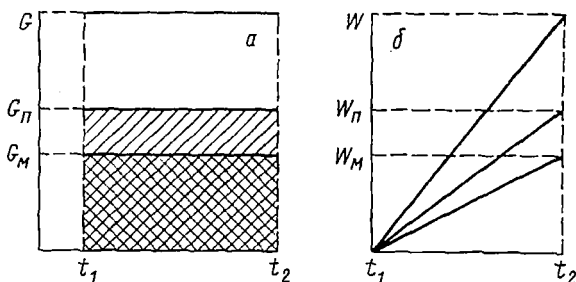


Рис. 1.4. Зависимость числа частиц от продолжительности облучения для методов сепарации по мгновенному излучению взаимодействия:

a — изменение скорости образования частиц; b — изменение общего числа частиц.

Методы II и III групп. Пусть облучаемый кусок находится в покое относительно источника излучения. Тогда число частиц, испускаемых куском в единицу времени, будет постоянным (рис. 1.4, a), а общее число испущенных частиц будет линейно возрастать с увеличением продолжительности облучения (см. рис. 1.4, b). При этом значения W_n и W_M и их соотношения могут меняться в определенных пределах, характерных для отдельных методов и перерабатываемого сырья. Наиболее благоприятные условия для проведения сепарации создаются, когда величина W_M равна нулю или имеет относительно малое значение. Такие условия, например, наблюдаются при фотонейтронном методе сепарации, основанном на использовании сурьмяных источников γ -излучения.

При перемещении куска относительно источника излучения характер рассматриваемых зависимостей изменяется. Обычно пучок по плотности неоднороден. Поэтому кривая изменения

количества частиц, исходящих от образца (кривая излучения), практически будет повторять кривую изменения плотности потока бомбардирующих частиц вдоль траектории перемещения куска руды (рис. 1.5, а). Облучение в этом случае происходит в основном в течение короткого интервала времени (например, $t_1—t_2$ на рис. 1.5, а), соответствующего прохождению

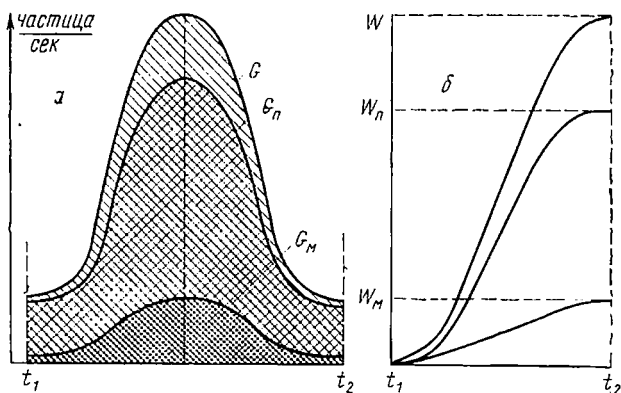


Рис. 1.5. Динамические кривые излучения для методов сепарации по мгновенному излучению взаимодействия:

а — дифференциальные; б — интегральные.

куска через наиболее плотную часть потока частиц. Чрезмерное увеличение продолжительности облучения путем расширения границ интервала $t_1—t_2$ (при постоянной скорости движения образца) не может увеличить выход полезных частиц. Величину последнего можно повысить, используя более мощный поток первичного излучения или уменьшая скорость перемещения куска относительно пучка, так как число взаимодействий частиц с образцом обратно пропорционально скорости его движения через пучок частиц. Интегральные кривые излучения для случая перемещения образца относительно пучка излучения показаны на рис. 1.5, б.

Активационные методы. Пусть образец находится в покое относительно пучка ионизирующего излучения. Как известно, активность a искусственно полученного изотопа в момент времени t_b после окончания облучения определяется формулой [72, 80]:

$$a = I_0 \Sigma_{\text{акт}} D [1 - \exp(-vt_0/T)] \cdot \exp(-vt_b/T). \quad (1.13)$$

При постоянных значениях I , $\Sigma_{\text{акт}}$ и D активность образующегося радиоизотопа определится произведением

$$[1 - \exp(-vt_0/T)] \exp(-vt_b/T), \quad (1.14)$$

а зависимость числа испускаемых частиц от времени, прошедшего с начала облучения до момента измерения ($t_0 + t_n$), будет функцией периода полураспада образующегося изотопа полезного или мешающего компонентов (рис. 1.6, а). Здесь и далее на рис. 1.7—1.11 не выделяются полезное и мешающее излучения, так как при размещении на графике нескольких кривых излучения, соответствующих различным периодам полураспада

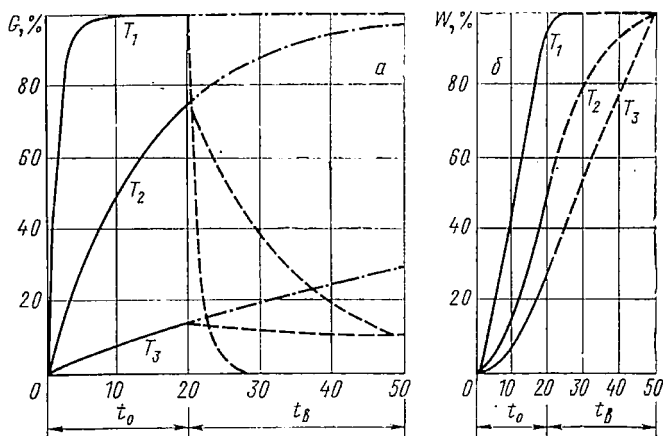


Рис. 1.6. Статические кривые излучения для активационных методов сепарации:

а — дифференциальные; б — интегральные.

да, не имеет значения, какая кривая относится к полезному, а какая к мешающему (в практике может встретиться любой вариант). На рис. 1.6 и 1.7 левые части кривых (сплошные линии) характеризуют изменение числа частиц, испускаемых образцом в момент облучения, а правые части кривых (пунктирные линии) — изменение числа испускаемых частиц после прекращения облучения. Графики построены для условий: периоды полураспада образующихся изотопов равны 1, 10 и 100 условных единиц времени (соответственно кривые T_1 , T_2 и T_3), продолжительность облучения t_0 и выдержки t_B равны соответственно 20 и 30 условных единиц. Дифференциальные (см. рис. 1.6, а) кривые излучения продолжены штрих-пунктиром до значения t_0 , соответствующего 50 условным единицам времени.

Как следует из рис. 1.6, а, при активационных методах сепарации кривые излучения имеют сложный вид, даже когда кусок находится в покое относительно пучка. По мере увеличения времени облучения кривая излучения поднимается до некоторого максимального значения, соответствующего 5—10

периодам полураспада образующегося изотопа. Дальнейшее увеличение времени облучения практически не приводит к увеличению числа испускаемых частиц, так как число образующихся в результате облучения ядер равно числу распадающихся. Чем короче период полураспада, тем при меньшем времени облучения наступает такой момент.

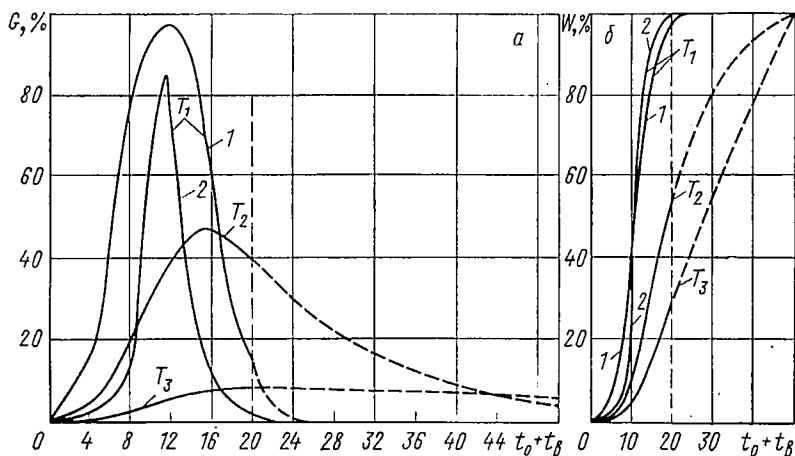


Рис. 1.7. Динамические кривые излучения для активационных методов сепарации:

a — дифференциальные; b — интегральные.

Своеобразными получаются и интегральные кривые излучения (см. рис. 1.6, б). Анализ кривых излучения наглядно показывает, что продолжительность облучения и выдержку при активационных методах сепарации необходимо выбирать в зависимости от периода полураспада образующихся изотопов (полезного и мешающего). При перемещении куска в однородном и достаточно широком пучке (площадь сечения пучка во много раз превышает сечение куска) характер кривых излучения аналогичен приведенному на рис. 1.6. При движении куска в неоднородном поле первичных частиц (подавляющее большинство реальных случаев) форма кривых излучения еще более усложняется.

Пусть вдоль траектории перемещения куска плотность потока частиц изменяется в соответствии с кривой 1 рис. 1.3, а. Кривые излучения (дифференциальные и интегральные), получаемые при этом, показаны на рис. 1.7. Там же для сравнения нанесены кривые излучения для более узкого пучка частиц, характеристика которого представлена кривой 2 на рис. 1.3, а. Анализ приведенных кривых показывает, что при перемещении образца относительно пучка излучения форма кривой излуече-

ния может существенно меняться в зависимости от степени однородности и формы пучка и периода полураспада образующегося изотопа.

4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Так же как и при рассмотрении процесса облучения, условия регистрации излучения можно разделить на две основные группы. В методах II и III групп регистрация излучения практически совпадает с моментом облучения. В активацион-

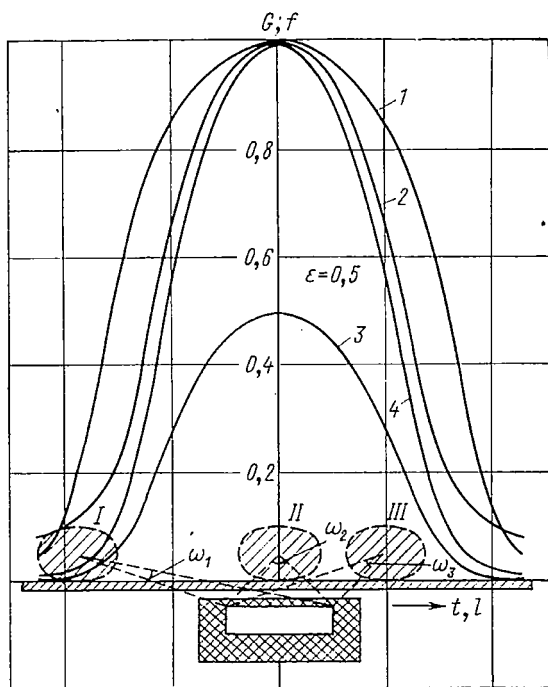


Рис. 1.8. Динамические кривые для методов сепарации по мгновенному излучению:

1 — приведенная кривая излучения; 2 — диаграмма направленности; 3 — расчетная кривая скорости счета; 4 — приведенная кривая скорости счета; I—III — положения образца.

ных методах излучение регистрируют в основном после завершения облучения.

Методы II и III групп. Когда кусок находится в покое относительно детектора (например, положение II на рис. 1.8), число регистрируемых импульсов будет определяться числом испускаемых образцом частиц, соотношением размеров куска и

детектора, расстоянием между ними, эффективностью регистрации излучения детектором, продолжительностью регистрации и т. п. При постоянных условиях средняя скорость счета импульсов не зависит от выбора и длительности периода регистрации излучения, а количество регистрируемых импульсов будет пропорционально длительности регистрации. Характер этих зависимостей совершенно аналогичен зависимостям, приведенным на рис. 1.4, с той разницей, что по оси ординат в данном случае необходимо откладывать среднюю скорость счета импульсов или количество импульсов.

Когда образец перемещается относительно детектора излучения, то одновременно с этим изменяются и некоторые величины, определяющие скорость счета импульсов: расстояние между куском и детектором, число частиц, испускаемых куском, и др.

Средняя скорость счета импульсов, регистрируемых радиометром, определяется видами дифференциальной кривой излучения (см. рис. 1.5, а) и диаграммой направленности узла детектирования излучения, а также эффективностью регистрации частиц ϵ выбранным детектором частиц. Диаграмма направленности [38] характеризует изменение чувствительности узла регистрации сепаратора вдоль траектории перемещения куска руды, выражаемое в долях ее максимального значения, достигаемого обычно в момент движения куска над центром детектора.

При наличии этих данных легко рассчитать кривую скорости счета импульсов, так как скорость счета импульсов, регистрируемая радиометром при положении куска в какой-либо точке на траектории его перемещения, определяется произведением соответствующих этой точке значений на кривой излучения и диаграмме направленности и эффективности регистрации ϵ . На рис. 1.8 помещены кривая излучения, диаграмма направленности и рассчитанная для $\epsilon=0,5$ кривая скорости счета импульсов, получаемая при данных условиях за время измерения радиометром плотности потоком частиц, исходящего от куска руды. Интегральная форма кривой скорости счета, получаемая в этом случае, аналогична форме кривых, показанных на рис. 1.5, б.

Активационные методы. При активационных методах сепарации излучение регистрируется в момент, когда происходит только распад образовавшихся при облучении радионуклидов. В связи с этим в процессе регистрации средняя скорость счета регистрируемых импульсов будет уменьшаться в соответствии с постоянной распада. Количество атомов, распадающихся за определенный промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$, равно

$$\Delta N = N_0 - N_1 = N_0 [1 - \exp(-\lambda \Delta t/T)], \quad (1.15)$$

где N_0 — количество атомов, имевшихся в момент окончания облучения t_1 ; N_1 — количество оставшихся атомов к моменту времени t_2 .

Нетрудно показать, что количество атомов ΔN_i , распадающихся в любом из n равных последовательных временных интервалов Δt , после прекращения облучения определяется выражением:

$$\Delta N_i = N_0 \exp [-(i-1) \nu \Delta t / T] \cdot [1 - \exp (-\nu \Delta t / T)], \quad (1.16)$$

а число атомов N_3 , распавшихся за время измерения t_3 в долях от первоначального количества атомов N_0 , имевшихся в момент окончания облучения, равно

$$N_3 = N_0 \exp (-\nu t_3 / T) [1 - \exp (-\nu t_3 / T)]. \quad (1.17)$$

Выражения (1.16) и (1.17) позволяют определять число или долю распавшихся атомов в различные интервалы времени после облучения. Так как их число пропорционально имеющемуся количеству атомов, то расчет кривой распада, выраженной в относительных единицах, удобно производить по формуле:

$$N_{\text{п}} = 100 N_0 \exp (-\nu t_{\text{в}} / T) \cdot \exp (-\nu n \Delta t / T) \quad (1.18)$$

или

$$N_{\text{п}} = 100 N_{\text{в}} \exp (-\nu n \Delta t / T), \quad (1.19)$$

где $N_{\text{п}}$ — количество атомов, оставшихся к моменту времени $t_{\text{в}}$; $N_{\text{в}}$ — количество оставшихся атомов по прошествии времени $n \Delta t$ после начала экспозиции, %.

Вид кривых распада, характеризующих изменение скорости распада ядер в процессе регистрации излучения для случая, когда образец находится в покое относительно детектора излучения, показан на рис. 1.9, а. Из графиков следует, что вид кривых определяется соотношением t_3/T . При $t_3/T \leq 0,01$ можно считать, что в процессе регистрации скорость распада практически не изменяется.

Расчет интегральной кривой распада в течение заданного времени измерения производится по формуле:

$$N_{\text{инт}} = N_0 \exp (-\nu t_{\text{в}} / T) [1 - \exp (-\nu i \Delta t / T)] \quad (1.20)$$

или

$$N_{\text{инт}} = N_{\text{в}} [1 - \exp (-\nu i \Delta t / T)]. \quad (1.21)$$

Пример таких кривых приведен на рис. 1.9, б. Как видно из графиков, с уменьшением соотношения t_3/T вид кривых изменяется и при $t_3/T \leq 0,01$ практически наблюдается линейная зависимость между числом распавшихся ядер и временем, прошедшим с начала регистрации. При больших значениях t_3/T (более 2—4) увеличение продолжительности измерения не дает существенного вклада в общее количество распадающихся ядер.

При перемещении куска относительно детектора происходит уменьшение числа распадов в единицу времени в соответствии с кривой распада изотопа и изменение телесного угла, под которым виден детектор излучения со стороны движущегося куска. При регистрации излучения важно, чтобы за время перемещения образца активность его изменялась бы незначи-

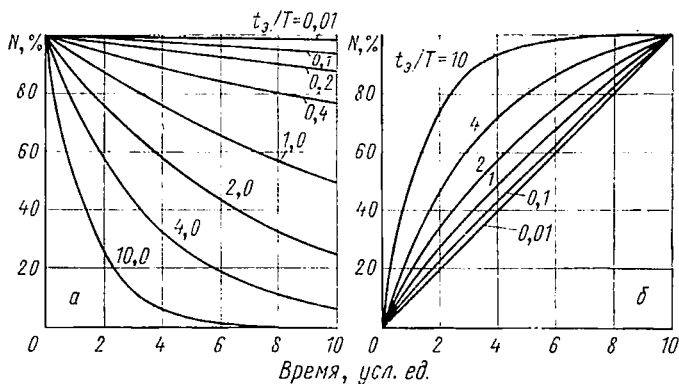


Рис. 1.9. Кривые распада:
а — дифференциальные; б — интегральные.

тельно, что способствовало бы более точной оценке содержания полезного компонента в рудном образце. Пусть l — длина пути, при прохождении которого регистрируется излучение куска руды, см; $t_3 = l/v$ — продолжительность регистрации, сек.

Тогда

$$N = N_0 \exp(-vt_3/T); \quad (1.22)$$

$$N = N_0 \exp(-vl/vT). \quad (1.23)$$

Примем, что

$$l/vT = u \quad (1.24)$$

и соответственно

$$N = N_0 \exp(-vu). \quad (1.25)$$

Коэффициент u представляет собой отношение интервала l к длине участка, который кусок может пройти за время, равное периоду полураспада ядер полезного компонента.

Равенства (1.22), (1.23) и (1.25) преобразуем к виду

$$N/N_0 = \exp(-vl/vT) = \exp(-vt_3/T); \quad (1.26)$$

$$N/N_0 = \exp(-vu). \quad (1.27)$$

Из формулы (1.27) следует, что отношение N/N_0 , т. е. степень уменьшения скорости распада ядер полезного компонента в процессе регистрации, определяется величиной коэффициента u . Как следует из табл. 1.4, выбор условий регистрации,

Таблица 1.4

Зависимость отношения N/N_0 от коэффициента u

u	N/N_0	u	N/N_0
3,0	0,125	0,4	0,757
2,0	0,250	0,2	0,870
1,0	0,500	0,1	0,933
0,8	0,574	0,01	0,993
0,6	0,660	0,001	0,9992

обеспечивающих малые значения коэффициента u , позволяет избежать резкого уменьшения активности в течение ее измерения. Так, например, при условиях регистрации, соответствующих $u \leq 0,2$, различие между скоростями распада в начале и конце периода регистрации не превышает 13%, при $u \leq 0,01$ — не более 0,7%.

Отношение N/N_0 можно изменять, варьируя при данном значении периода полураспада T интервалами l и скоростью перемещения кусков v или изменяя продолжительность регистрации t_0 . Излучение короткоживущего изотопа можно эффективно регистрировать лишь при больших скоростях движения кусков руды относительно счетчика излучения, т. е. при значениях N/N_0 , приближающихся к 1,0.

С учетом изложенного можно отметить, что при активационных методах обогащения руд параметры и форма кривой скорости счета импульсов, регистрируемых радиометром за время перемещения куска в зоне чувствительности счетчика излучений, будет определяться параметрами и формами кривой излучения (в данном случае кривой распада) и диаграммы направленности измерительного узла сепаратора, а также эффективностью регистрации излучения и значением коэффициента u .

На рис. 1.10 показано семейство приведенных кривых скоростей счета для различных значений коэффициента u . Из графиков видно, что форма кривых определяется параметром u . При $u=20$ вид кривой скорости счета близок к виду кривой распада. С уменьшением u форма кривой постепенно приближается к форме диаграммы направленности датчика и при $u \ll 1$, что соответствует значениям ($N/N_0 > 0,5$), оба типа кривых практически совпадают. Это обстоятельство важно учитывать на практике. Пренебрежение этим может привести к тому, что основная доля частиц, испускаемых куском, будет регистрироваться в момент значительного удаления куска от детектора (кривые на рис. 1.10, соответствующие $u=20$ и $u=12$), а не в тот момент, когда кусок проходит над центром детектора. В результате будет наблюдаться резкое снижение числа регистрируемых импульсов, а это ухудшает эффективность сепарации.

Важный вывод, следующий из формулы (1.26), заключается также в том, что для сохранения постоянным отношения N_i/N_0 (при уменьшении периода полураспада) необходимо увеличивать скорость движения кусков, т. е. соответственно уменьшать продолжительность регистрации. При этом скорости, опреде-

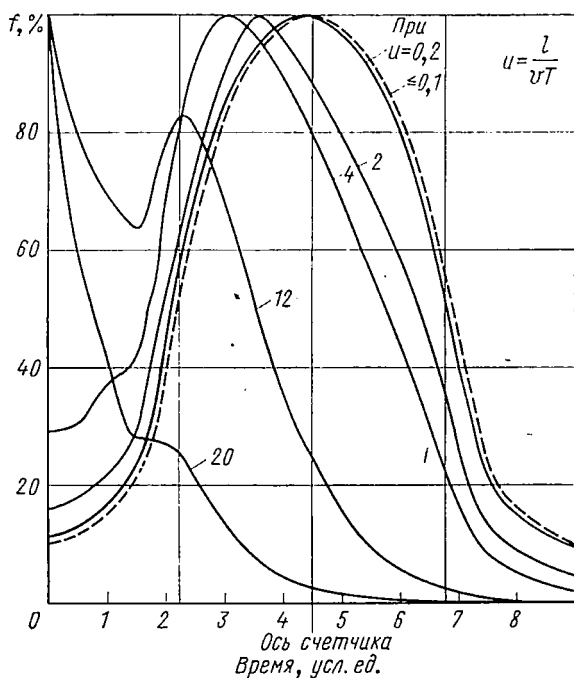


Рис. 1.10. Приведенные дифференциальные кривые скорости счета импульсов.

ляемые при помощи формулы (1.26), — минимально необходимые, а длительность измерения максимально допустима при данных значениях u , l и T . Интегральные кривые скорости счета с учетом диаграммы направленности, кривой распада и других факторов можно рассчитать по формуле:

$$N_{\text{шт}} = N_0 \varepsilon \sum_{i=1}^{i=m} [b_i \exp(-v_i \Delta t / T)], \quad (1.28)$$

где $i=1, 2, \dots, m$ — число интервалов ($m\Delta t = t_0$); b_i — коэффициент, определяющий степень направленности измерительного узла сепаратора; ε — эффективность регистрации излучения детектором.

До сих пор практически не учитывался тот факт, что при любом методе сепарации регистрация полезного излучения

всегда осуществляется в присутствии постороннего излучения, создаваемого различными источниками (источником первичного излучения; излучениями, возникающими при взаимодействии первичного излучения с окружающей средой; космическим излучением, а также излучениями некоторых изотопов, образующихся при взаимодействии первичного излучения с веществом куска руды и т. п.). Разделим условно все виды постороннего излучения на две группы: фоновое (первые три причины, указанные выше) и мешающее (излучение изотопов сопутствующих компонентов, находящихся в руде совместно с полезным компонентом, излучения соседних кусков и др.). Обе группы принципиально различаются между собой.

Фоновое излучение не связано с рудными кусками. Как правило, величину регистрируемого фона можно уменьшить до малых значений путем соответствующей экранировки детекторов или даже всего измерительного узла сепаратора. Фоновое излучение (с учетом статистического характера распада радиоактивных веществ) можно считать постоянным во времени или изменяющимся в зависимости от периода полураспада создающих его источников излучения. В любом случае всегда имеется принципиальная возможность определить его средний уровень в заранее заданный промежуток времени.

Мешающее излучение создается кусками руды и испускается или самим куском руды, который в данный момент измеряется, или соседними кусками (эффект подсветки). Чаще всего действие обеих причин проявляется одновременно. Уровень мешающего излучения в процессе сепарации может изменяться в больших пределах соответственно тому, как меняется расстояние между кусками, их вещественный состав и т. п. Эффект подсветки уменьшают, подавая куски руды в зону измерения на определенном расстоянии друг от друга, обеспечивая допустимый уровень подсветки. Влияние мешающего излучения, создаваемого самим контролируемым куском, уменьшают различными приемами, среди которых основные: выбор вида и энергии первичного излучения, подбор времени облучения и выдержки, применение таких типов детекторов, которые менее чувствительны к мешающему излучению, применение спектрометрических методов регистрации излучения или специальных электронных схем (схемы совпадений, антисовпадений и т. д.), экранировка мешающего излучения и др. Очень часто, применяя один или несколько из указанных способов, удается резко снизить (или полностью устранить) влияние собственно мешающего излучения. Таким примером может служить сепарация медных руд нейтронноактивным методом по аннигиляционному излучению Cu^{64} (см. стр. 96).

На практике всегда стремятся к снижению уровней фонового или мешающего излучения, зная, что уровень посторонне-

го излучения во многом определяет порог чувствительности сепараторов.

Таким образом, в результате облучения и последующего измерения потоков частиц, исходящих от кусков руды, детектор радиометра регистрирует суммарный поток излучения, представляющий собой смесь частиц, обусловленных наличием в кусках руды полезного G_1 и сопутствующих G_2 компонентов, а также фонового излучения G_3 . Общее число частиц G , регистрируемых радиометром, равно $G_1 + G_2 + G_3$. Здесь можно выделить два характерных случая, в первом из которых уровень мешающего излучения пропорционален (или ограниченно пропорционален) уровню полезного излучения, а во втором — не зависит от содержания полезного компонента и остается практически постоянным для кусков с одинаковой массой. В обоих случаях создаются условия для процесса сепарации, хотя и менее эффективного, чем при полном отсутствии мешающего излучения. В первом варианте мешающее излучение как бы добавляется к полезному, во втором — мешающее излучение можно считать фоновым. Во всех промежуточных вариантах влияние мешающего излучения практически не поддается учету и условия для сепарации минерального сырья мало благоприятны. С учетом сделанных замечаний будем считать, что регистрируемый уровень излучения G при перемещении рудных кусков через зону измерения определяется выражением

$$G = G_{\text{п}} + G_{\text{ф}}. \quad (1.29)$$

При этом в зависимости от условий под $G_{\text{п}}$ понимается или только полезное излучение G_1 , или полезное и мешающее одновременно ($G_1 + G_2$), а под $G_{\text{ф}}$ понимается собственно фоновое излучение G_3 или сумма фонового и мешающего ($G_3 + G_2$).

5. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ СОРТИРОВОЧНЫХ УСТАНОВОК

Обогащение полезных ископаемых при помощи ядернофизических методов осуществляется на специальных сортировочных установках (сепараторах). Некоторые из них имеют много общих черт с сепараторами, используемыми для радиометрического обогащения руд. Ядернофизические сепараторы отличаются от радиометрических тем, что у них имеются внешние источники излучения. Это обстоятельство предъявляет к сортировочным установкам специфические требования, связанные с размещением и компоновкой отдельных узлов, защиты детекторов и обслуживающего персонала от первичного излучения и т. п. Некоторые из методов позволяют проводить сепарацию кусков руды, движущихся с большими скоростями (до 5—10 м/сек). Это выдвигает дополнительные требования к аппаратуре, ее конструкции и параметрам, которые не предъявлялись к радиометрическим сепараторам. С учетом изложен-

ного отдельные сепараторы, предназначенные для обогащения руд ядернофизическими методами, могут существенно отличаться по своей конструкции от радиометрических и других сепараторов.

Каждая сортировочная установка состоит из узлов питания, облучения, регистрации, разделения и вспомогательных узлов. Можно выделить две основные группы установок:

1) установки, предназначенные для методов сепарации, где процессы облучения и регистрации совпадают во времени (абсорбционные, гамма-, нейтронные и др.);

2) установки, предназначенные для методов сепарации, где процессы облучения и регистрации разделены во времени (активационные и др.).

В установках первой группы источник излучения обязательно должен располагаться в непосредственной близости от сепаратора или конструктивно входить в его состав, образуя единый облучательно-измерительный узел. В установках второй группы узлы облучения и регистрации, как правило, разделены в пространстве; иногда они могут располагаться даже в разных помещениях.

Ниже рассматриваются основные узлы сортировочных установок для сепарации полезных ископаемых ядернофизическими методами. Описание конкретных сепараторов, поскольку на их конструкцию оказывают влияние специфические условия осуществления того или иного метода сепарации, дается при рассмотрении отдельных методов обогащения сырья в следующей главе.

Узлы питания. Назначение питателей в сортировочных установках — подача руды на облучение или сепарацию (или на то и другое одновременно) в виде определенного, заранее заданного потока рудной массы или отдельных кусков руды. В зависимости от используемых режимов облучения или сортировки к конструкции узлов питания предъявляются различные требования.

Наиболее простые требования предъявляются к узлам питания для подачи руды на облучение или сепарацию в поточном режиме.

Для решения такой задачи иногда бывает достаточно использовать один питатель, например, лоткового типа. Наиболее сложны узлы питания для покусковой подачи сырья на облучение или сепарацию, особенно если при этом требуется обеспечивать высокие скорости движения кусков руды. Поэтому здесь используются не отдельные питатели, а их комплекс, состоящий из нескольких различных по типу питателей или приспособлений. Задача такого комплекса — преобразование потока сырья, выходящего из бункера установки, для придания ему требуемой формы и структуры.

Схема одного из наиболее совершенных узлов питания показана на рис. 1.11 [50, 62]. Узел состоит из бункера и трех питателей: вибрационного, конического и ленточного. Принцип действия такого комплекса заключается в следующем. Руда определенной крупности, загруженная в бункер, поступает вначале на вибрационный, а затем на конический питатель. Конус, вращаясь с большой скоростью, располагает куски в один ряд вдоль ограничительной стенки у его основания и подает их на ленточный конвейер.

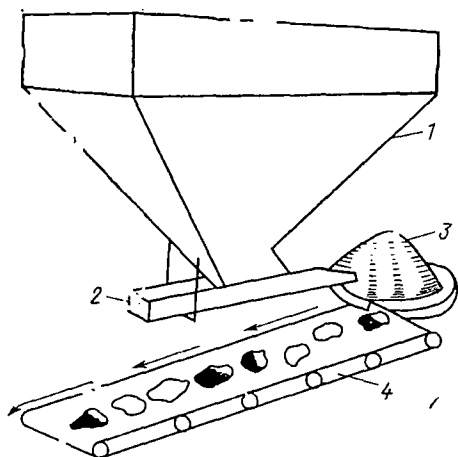


Рис. 1.11. Узел питания сепаратора КН:

1 — бункер; 2 — вибрационный питатель;
3 — конусный питатель; 4 — конвейер.

С транспортера куски руды свободно падают вниз. Подобные узлы питания обеспечивают постепенное уменьшение плотности рудного потока с одновременным увеличением скорости движения кусков руды. В результате куски постепенно выстраиваются в один ряд на определенном среднем расстоянии друг от друга. В зависимости от требований, предъявляемых к потоку руды, ее облучение и сортировка могут осуществляться в разных точках на пути движения кусков: на сходе с конического питателя, на ленте транспортера и в свободном падении с конического или ленточного питателя. Име-

ются и другие типы узлов питания [29, 50, 64, 65]. Рассмотренные примеры наглядно иллюстрируют принципиальную схему и задачи, решаемые при помощи узлов питания.

Узлы облучения, как правило, состоят из источника излучения, коллиматора, защитных приспособлений от первичного излучения (экраны, контейнеры, защитные стенки и т. п.), систем управления источником (пульт или щит управления), сигнализации и т. п.

Куски через узел облучения перемещаются при помощи транспортирующих устройств или в результате падения с какого-либо питателя. Схемы некоторых известных узлов показаны на рис. 1.12 [44, 65, 83, 84, 87, 88, 95]. Схема I характеризует условия облучения кусков руды, находящихся на транспортной ленте, сильнопроникающим излучением (нейтронами или γ -квантами). На схеме II источник излучения расположен над лентой, что создает возможность облучать руду не только нейтронами и γ -квантами, но и электронами. По схеме III облучают

куску, находящиеся в свободном падении, а по схеме IV — при скольжении по наклонной плоскости. Схема V позволяет значительно увеличить продолжительность облучения руды. Принцип действия этих узлов достаточно ясен из приведенных схем.

Конструкции узлов облучения должны обеспечивать полную радиационную безопасность работ, достаточно высокую

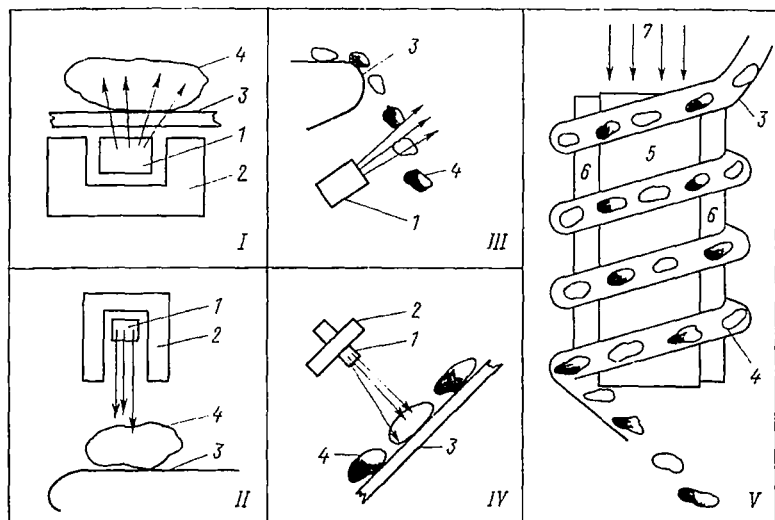


Рис. 1.12. Схемы узлов облучения:

1 — источник излучения; 2 — защитный экран; 3 — транспортирующий элемент сепаратора; 4 — кусок руды; 5 — бериллиевая мишень; 6 — замедлитель нейтронов; 7 — тормозное излучение.

производительность, равномерность (в пределах возможного) облучения всего потока сырья и постоянство времени облучения каждого куску (порции) руды. Радиационной безопасности работ достигают, применяя различные контейнеры, экраны, системы управления, сигнализации, блокировки и т. п. Для повышения равномерности облучения всего объема сырья в некоторых конструкциях узлов предусматривается многостороннее облучение рудного материала.

Узлы регистрации в сортировочных установках служат для измерения потоков частиц, испускаемых кусками руды, некоторых параметров рудной массы (например, размеров кусков), логического анализа полученной информации и выдачи команды (сигнала) на разделяющее устройство. Соответственно этому в узлы регистрации помимо рудосортировочного радиометра с детектором излучения могут входить устройства для учета массы кусков руды и фиксации подхода куску к зоне измерения. Сигналы с этих устройств также поступают в радиометр,

который обрабатывает полученную информацию и выдает сигнал на разделяющее устройство. Детекторы излучения, как правило, окружают материалами, защищающими их от воздействия посторонних излучений.

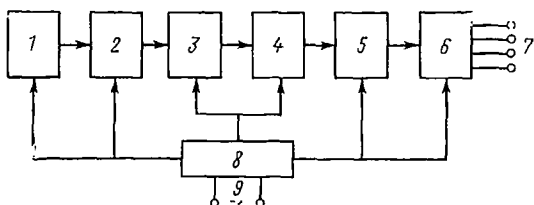


Рис. 1.13. Типовая структурная схема рудосортировочного радиометра:

1 — детектор излучения; 2 — усилитель импульсов; 3 — формирующий каскад; 4 — измеритель скорости счета или устройство абсолютного счета; 5 — пороговый каскад; 6 — исполнительный каскад; 7 — выход к сепаратору; 8 — блок питания; 9 — сеть.

Основная часть узла измерения — рудосортировочный радиометр, структурная схема которого изображена на рис. 1.13. Она включает следующие основные блоки: детектор излучения, усилитель импульсов, формирующий каскад, измеритель скорости счета или устройство абсолютного счета импульсов, пороговый каскад и исполнительное устройство [38, 39]. Применительно к различным ядернофизическим методам сепарации структурная схема радиометра может изменяться.

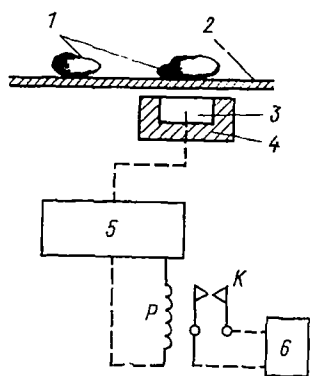


Рис. 1.14. Схема узла регистрации.

Наиболее широко распространены узлы регистрации с детектором излучения, расположенным непосредственно под потоком движущегося рудного материала (на ленте конвейера, по вибрлотку, в свободном падении). Как правило, регистрация излучения производится лишь с одной стороны потока (угловой коэффициент Ω колеблется в пределах 0,1—0,3). На рис. 1.14 показана схема одного из таких узлов регистрации. Куски руды 1, расположенные на транспортирующем устройстве сепаратора 2, движутся над детектором излучения (датчиком радиометра) 3, находящимся за защитным экраном 4. Скорость перемещения рудных кусков обычно находится в пределах от 0,1 до 1 м/сек. Электрические импульсы, возникающие в датчике радиометра при регистрации излучения активированных

кусков руды, по кабелю передаются в радиометр 5. Если число зарегистрированных за экспозицию импульсов (средняя скорость счета) превысит заданный уровень, на который настроен прибор, то радиометр через контакты *K* реле *P* подает сигнал о срабатывании на разделяющее устройство установки 6.

Более совершенный и производительный узел регистрации (рис. 1.15) применяется в сепараторе типа КН [50, 62]. Узел представляет собой систему источников света, фотоэлектрического элемента, радиометра со сцинтилляционным датчиком и

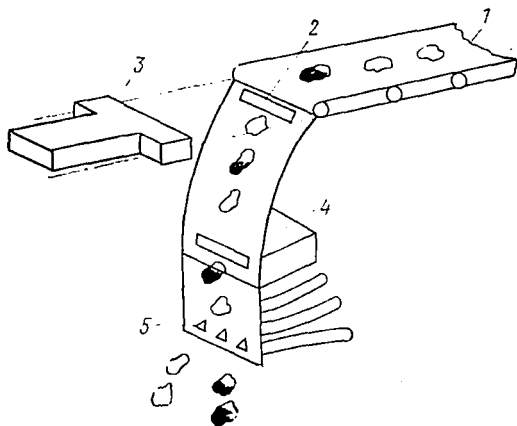


Рис. 1.15. Узел регистрации сепаратора КН:

1 — конвейер; 2 — неоновые лампы; 3 — фотоэлемент;
4 — сцинтилляционный детектор γ -излучения; 5 — пневмоклапаны.

экранов. Регистрация излучения кусков руды, размеров и времени подхода кусков к зоне измерения производится во время свободного падения рудного сырья. Падающие куски пересекают световой луч, идущий от неоновой лампы к фотоэлементу, а затем пролетают около детектора излучений. Время прохождения куска через световой пучок определяет размер куска, обычно связанный определенной зависимостью с его массой. На основе этих измерений радиометр автоматически вводит поправку на массу куска в зарегистрированное за экспозицию число импульсов (среднюю скорость счета). Время регистрации излучения, испускаемого активированным рудным образцом, составляет в данных условиях менее 0,1 сек. В зависимости от соотношения скорректированной по массе куска скорости счета импульсов и заданной настройки радиометр также, как и ранее (см. рис. 1.14), выдает сигнал на разделяющее устройство сепаратора. Для улучшения порога чувствительности радиометра детекторы излучения в таких установках экранируются свинцовыми экранами. В сепараторе КН толщина стенок экрана 150—180 мм, а общая его масса около 6 т. Про-

изводительность узла измерения при сепарации класса крупностью — 200+50 мм составляет 25—50 т/ч.

Известны и другие конструкции узлов измерения [63, 64, 77, 87, 92]. Для обнаружения и регистрации излучения в описываемых узлах используют самые разнообразные счетчики [56, 72]. В частности для регистрации нейтронов применяют газоразрядные счетчики с борным или гелиевым наполнением

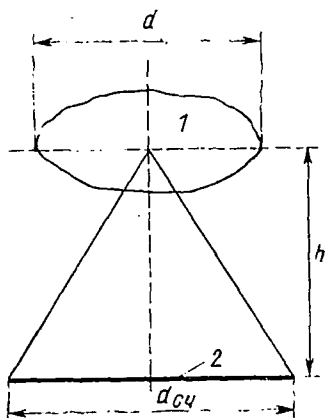


Рис. 1.16. К расчету геометрического коэффициента:

1 — кусок руды; 2 — поверхность детектора излучения.

и сцинтилляционные детекторы, а для детектирования γ -квантов, электронов и других заряженных частиц — газоразрядные и сцинтилляционные счетчики. Выбор того или иного типа счетчика прежде всего определяется эффективностью регистрации данного вида излучения в конкретных условиях. Немаловажное значение имеют и такие параметры счетчиков, как форма и размеры их чувствительной поверхности, «мертвое» время, уровень рабочего напряжения, чувствительность к посторонним излучениям, уровень фона, вид рабочей характеристики и т. п. Некоторые из этих параметров (форма и размеры счетчика, уровень регистрируемого фона) непосредственно влияют на условия сепарации, изменяя соотно-

шение размеров кусков и счетчиков. Подробно эти вопросы для статических условий регистрации излучений изложены в работах [43, 72]. Рассмотрим их в применении к регистрации излучения в условиях сортировочных установок.

Пусть регистрация частиц осуществляется детектором, имеющим круглую чувствительную поверхность диаметром $d_{сч}$. Расстояние от поверхности детектора до центра перемещающихся параллельно чувствительной поверхности счетчика рудных кусков с диаметром d равно h (рис. 1.16). Потери первичного излучения, связанные со взаимным расположением рудного образца и детектора излучения, учитываются поправкой на телесный угол или иначе геометрическим коэффициентом Ω , равным отношению телесного угла ω , под которым счетчик облучается куском руды, к полному телесному углу 4π .

Для условий, когда рудный образец можно принять за точку по сравнению с размерами счетчика, справедливо равенство [43]

$$\Omega = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + (d_{сч}^2/4)}} \right). \quad (1.30)$$

Коэффициент Ω в зависимости от соотношения $h/d_{сч}$ изменяется от 0,5 (при $h/d_{сч}=0$) до 0 (при $h/d_{сч}=\infty$).

Если рудный образец не может быть принят за точку относительно детектора, то расчеты существенно усложняются, хотя и здесь могут быть получены определенные значения геометрического коэффициента (табл. 1.5) [43]. Значения коэффициента Ω для $d/d_{сч}=0$ соответствуют случаю, когда кусок можно принять за точку.

Таблица 1.5
Зависимость геометрического коэффициента Ω от соотношений $d/d_{сч}$ и $h/d_{сч}$

$h/d_{сч}$	$d/d_{сч}$							
	0,0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	2,0	5,0
0,0	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,320	0,125	0,020
0,05	0,450	0,449	0,445	0,428	0,418	0,286	0,118	0,0196
0,1	0,402	0,400	0,392	0,364	0,345	0,253	0,111	0,0192
0,2	0,314	0,312	0,300	0,264	0,240	0,197	0,098	0,0184
0,3	0,246	0,242	0,229	0,199	0,181	0,158	0,0858	0,0176
0,4	0,188	0,185	0,176	0,155	0,143	0,127	0,0751	0,0168
0,5	0,146	0,145	0,138	0,122	0,115	0,102	0,0661	0,0160
1,0	0,0527	0,0525	0,0511	0,0501	0,0466	0,0448	0,0330	0,0125
1,5	0,0256	0,0255	0,0250	0,0242	0,0240	0,0238	0,0200	0,0096
2,0	0,0150	0,0149	0,0146	0,0145	0,0143	0,0142	0,0128	0,0074
2,5	0,0098	0,0097	0,0097	0,0095	0,0095	0,0094	0,0087	0,0058
5,0	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0024	0,0022	0,0020

Из табл. 1.5. видно, что при значениях $d/d_{сч} \ll 1,0$ и при отношениях $h/d_{сч} \leq 0,2$ и $h/d_{сч} > 1,0$ значения геометрического коэффициента мало отличаются от его значений по формуле (1.30). Расчет показывает, что отклонение не превышает 10%. Это обстоятельство позволяет для отмеченных выше условий ограничиваться расчетами только по формуле (1.30). Лишь при $0,2 < h/d_{сч} < 1,0$ погрешности могут достигать 20—25%. При $d/d_{сч} > 1,0$ значения коэффициента Ω резко отличаются от рассчитанных по формуле (1.30).

Для увеличения геометрического коэффициента при $d/d_{сч} > 1,0$ датчик импульсов радиометра иногда монтируется из нескольких счетчиков, включенных параллельно. На такой счетчик распространяются выводы, изложенные выше для одиночных детекторов с учетом суммарной фактической чувствительной поверхности всех счетчиков, расположенных в одной кассете. Если счетчик будет иметь чувствительную поверхность в виде прямоугольника со сторонами x и y (сторона x расположена параллельно траектории движения куска руды), то при $y = d_{сч}$ следует ожидать, что интегральный геометрический коэффициент будет значительно приближаться к значениям коэффициента Ω для отношений $d/d_{сч} < 1,0$.

Как отмечалось, некоторые узлы регистрации оснащаются системами для учета массы кусков. К настоящему времени известно несколько принципов, положенных в основу определения массы кусков в процессе сепарации. Большинство из них предусматривает не прямое определение массы кусков, а косвенное, главным образом через геометрические параметры кусков руды. Остановимся на способах учета массы, основанных на: а) создании определенных геометрических условий регистрации излучения кусков руды, автоматически учитывающих

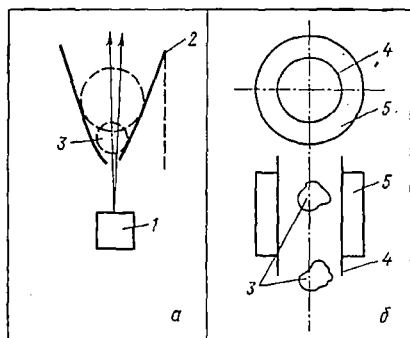


Рис. 1.17. Схемы устройств для геометрического взвешивания кусков руды:

а — конусная ячейка; б — цилиндрическая труба; 1 — источник γ -излучения; 2 — откидное дно ячейки; 3 — куски руды; 4 — труба; 5 — пластмассовый сцинтиллятор.

массу (размеры) кусков (геометрическое взвешивание), и б) определении отдельных физических параметров кусков руды, так или иначе связанных с массой рудных образцов.

Наиболее просты способы геометрического взвешивания. Среди них можно выделить два вида. В первом из них число регистрируемых импульсов (скорость счета импульсов) определяется в основном содержанием полезного компонента и слабо зависит от массы кусков. Во втором — количество регистрируемых импульсов пропорционально массе отдельных кусков и практически не зависит от содержания

полезного компонента. Следует отметить, что в обоих случаях строгой линейной зависимости между указанными параметрами не наблюдается и что все подобные зависимости статистические и их линейность соблюдается в ограниченных интервалах. Однако простота способов привлекательна.

К первому типу геометрического взвешивания относятся способы, описанные в работах [23, 62]. Регистрация излучения происходит при положении кусков в конусообразных ячейках с откидными боковыми стенками или днищами (рис. 1.17, а). Ячейки изготовляют нескольких типоразмеров, каждый из которых предназначен для сепарации определенного класса крупности. Благодаря такой форме ячеек для кусков обеспечивается постоянство телесного угла при облучении детектора излучения независимо от размеров кусков, поданных в ячейку. В результате этого, а также эффекта самопоглощения излучения в самих кусках, радиометр регистрирует плотность потока излучения, значение которой мало зависит от массы кусков.

Другой вид геометрического взвешивания образцов — вариант, рассмотренный в работе [92]. В этом случае активирован-

ные куски руды свободно падают через трубу, окруженную пластмассовым сцинтиллятором (см. рис. 1.17, б). Мера массы куска — общий поток γ -квантов, зарегистрированный радиометром. Количество сосчитанных за экспозицию импульсов оказывается пропорциональным массе куска руды. Получаемая таким образом информация о массе куска используется в радиометре для введения поправки в другую информацию от того

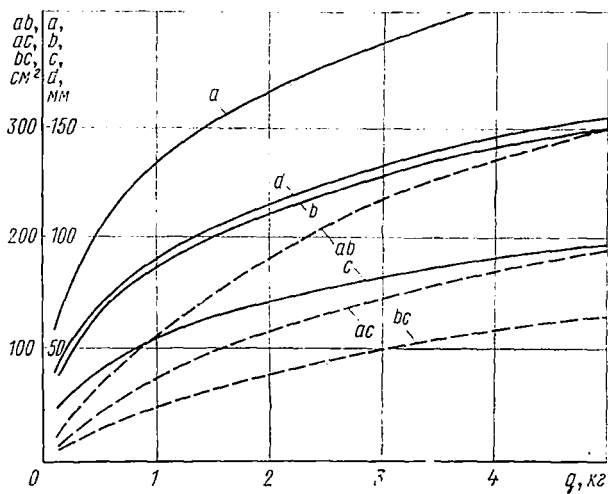


Рис. 1.18. Зависимость между основными параметрами кусков и их массой:

a, b, c, d — соответственно длина, ширина, толщина и диаметр кусков; ab, ac, bc — величины, пропорциональные соответствующим сечениям кусков.

же куска (в данном случае путем регистрации аннигиляционного излучения) для учета влияния массы исследуемого образца.

Более известны устройства для учета массы кусков, основанные на измерении в процессе их движения каких-либо физических параметров, тесно связанных с массой рудных образцов. Такие параметры — линейные размеры (максимальные длина a , ширина b и толщина c и средний размер кусков d) или поперечные сечения кусков (проекции кусков на одну из плоскостей в декартовой системе координат). Исследования большого количества руд различных типов показали, что между этими параметрами и массой образцов имеются определенные, характерные для каждого вида сырья статистические зависимости типа изображенных на рис. 1.18, которые на участках, соответствующих отдельным достаточно широким классам крупности, можно интерполировать как линейные зависимости вида $y = kx + m$.

Для учета массы кусков можно использовать любой из их параметров, особенно те, которые обеспечивают наибольшую чувствительность к изменению массы кусков (параметры a , ab и др.). В настоящее время при реализации рассматриваемых способов можно выделять лишь способы, основанные на измерении линейных размеров или площадей поперечных сечений. Это связано с тем, что при перемещении кусков через измерительный узел их расположение относительно датчика измерительных устройств оказывается случайным и поддается учету только на основе законов статистики. При каждом прохождении куска через зону измерения может быть зарегистрирован какой-либо из его линейных размеров или какое-либо сечение. Очевидно, в этом случае за меру линейных размеров следует принять средний размер (диаметр) кусков, а мерой сечений может быть квадрат диаметра куска. Описанные условия приводят к относительно большим погрешностям в определении истинных размеров, а следовательно, и массы кусков. Однако, несмотря на это, практика показывает, что учет массы кусков на основе рассмотренных принципов обеспечивает эффективную сепарацию широких классов крупности. Так, например, система учета массы кусков, основанная на учете линейных размеров кусков, позволяет эффективно обогащать класс —200+50 мм [50, 62].

Облучательно-измерительный узел, представляющий комбинацию облучательного и измерительного узлов, рассмотренных выше, — специфичный узел сортировочных установок, в которых моменты облучения и регистрации практически не разделены во времени. Каждый из таких узлов включает источник излучения, радиометр с соответствующим детектором излучений, различные экраны, в том числе защищающие детекторы от воздействия первичного излучения. В необходимых случаях облучательно-измерительные узлы оснащаются системами для фиксации подхода и учета массы кусков. Принципиальные схемы некоторых из известных облучательно-измерительных узлов представлены на рис. 1.19 [21, 24, 49, 86].

Узел, изображенный на схеме I, применяют при γ -абсорбционных методах сепарации полезных ископаемых. Это один из наиболее простых вариантов описываемых узлов. В нем источник излучения и датчики радиометра располагаются напротив друг друга так, чтобы в отсутствие рудных образцов коллимированный пучок излучения попадал на детектор. Куски руды, перемещаясь через пространство между источником и детектором, ослабляют первичное излучение, которое регистрирует детектор. В зависимости от степени поглощения первичного излучения и уровня настройки радиометра последний дает сигнал на срабатывание разделяющего устройства. На схеме II показан более сложный узел, применяемый также при абсорбционных методах сепарации. В этот узел кроме основного

источника включён ещё один дополнительный, энергия излучения которого отличается от энергии излучения первого источника. В результате этого создаются условия для учета в процессе сепарации толщины кусков для исключения влияния размеров образцов на результаты обогащения сырья. Схема III может применяться при различных методах сепарации, основанных на регистрации рассеянного излучения, мгновенного

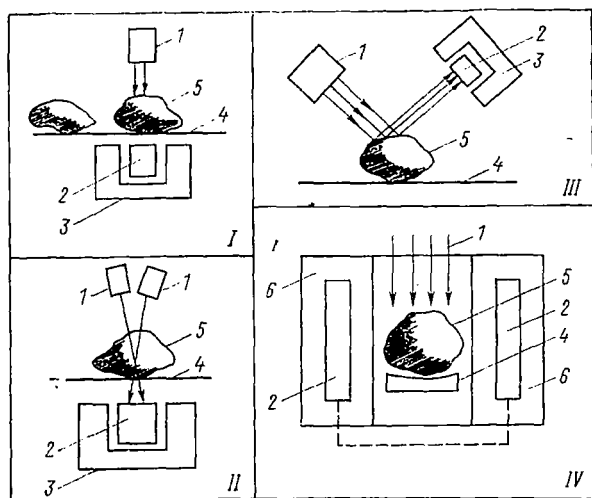


Рис. 1.19. Схемы облучательно-измерительных узлов:

1 — источник излучения; 2 — детектор излучения; 3 — экран;
4 — транспортирующее устройство; 5 — куски руды; 6 — замедлитель нейтронов.

излучения ядерных реакций и т. п. На схеме IV изображен узел, где в качестве источника первичного излучения используется ускоритель электронов.

Рудная масса после регистрации излучения радиометром поступает в *узел разделения*, где при помощи специальных приспособлений по сигналу, поступающему с радиометра, из общего потока руды выделяются тем или иным способом отдельные куски (или порции) руды, представляющие собой концентрат или хвосты.

Как правило, описываемые узлы состоят из разделяющего механизма определенной конструкции, управляемого сигналом от измерительного узла, течек и других устройств. Технологически узел разделения всегда следует за узлом измерения. Однако конструктивно они могут быть даже совмещены. Все зависит от типа применяемого разделяющего устройства и его конструктивных особенностей. Наиболее распространены ши-

берные и пневматические разделяющие устройства. Шибберные механизмы применяют только в сепараторах с небольшой частотой срабатывания (от 1 до нескольких раз в секунду). Область применения пневматических разделительных механизмов (пневмоклапанов и т. п.) — высокопроизводительные процессы, осуществляемые в покусковом режиме. Частота срабатывания клапанов различных конструкций колеблется от 5—10 до 200—300 гц [50, 62, 77].

Помимо рассмотренных выше основных узлов каждая из сортировочных установок оснащается еще и другими устройствами. К ним можно отнести: некоторые транспортирующие или направляющие устройства, экраны, замедлители, защитные стены, блоки системы контроля, сигнализации, блокировки, устройства для дополнительной отмывки мелких частиц непосредственно в пределах сортировочной установки и отвода песков и шламов и т. п. Число и вид таких устройств различны для каждой установки. Необходимость тех или иных вспомогательных приспособлений определяется задачами, для выполнения которых создана установка, характеристиками перерабатываемого сырья и требованиями радиационной безопасности работ.

6. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ УСТАНОВОК И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ

Рассмотреть данные вопросы в общем виде, справедливом для всех ядернофизических методов сепарации, в настоящее время не представляется возможным в связи с большим разнообразием условий регистрации излучений. Поэтому материал раздела излагается только в применении к методам групп II, III и IV (см. табл. 1.3). При этом предполагается, что процесс сепарации осуществляется при следующих условиях: а) форма, размеры и масса всех сортируемых кусков одинакова; б) мешающее излучение отсутствует или оно может быть учтено в соответствии с выражением (1.29); в) излучение регистрируется методом счета числа импульсов; г) число регистрируемых радиометром импульсов пропорционально содержанию определяемого компонента в кусках руды. Несмотря на такую ограниченность излагаемый материал дает достаточно правильное представление о закономерностях и статистических характеристиках процесса сепарации, что способствует более глубокому пониманию объективных возможностей рассматриваемых методов. В то же время изложенные в разделе принципы и приведенные формулы могут быть использованы для приблизительной оценки технологических параметров сортировочных установок и возможностей некоторых методов сепарации для конкретных условий их реализации.

Для постоянных конкретных условий облучения и измерения, когда образцы находятся в покое относительно датчика радиометра, среднее число регистрируемых импульсов (полезных и фоновых) равно соответственно:

$$F'_n = Q_c D \Pi t_3; \quad (1.31)$$

$$F'_\phi = f_\phi t_3 \quad (1.32)$$

и

$$F' = Q_c D \Pi t_3 + f_\phi t_3. \quad (1.33)$$

Из формулы (1.31) следует, что

$$Q_c = F'_n / D \Pi t_3. \quad (1.34)$$

Отсюда вытекает, что параметр Q_c характеризует чувствительность аппаратуры и выражается в *имп/сек* на 1 г полезного компонента и единицу мощности источника излучения или плотность потока частиц, испускаемых источником. Параметр Q_c можно назвать статической чувствительностью установки, так как его определяют в статическом положении «эталоны» с массой g в центре измерительной зоны сортировочной установки.

При заданной скорости перемещения и постоянных других условиях число зарегистрированных импульсов будет определяться выражением

$$F_n = D \Pi \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (1.35)$$

и с учетом (1.32)

$$F = D \Pi \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt + f_\phi t_3, \quad (1.36)$$

где $f(t)$ — функция, характеризующая изменение скорости счета полезных импульсов за время их регистрации.

В большинстве случаев функция $f(t)$ точно нам неизвестна. Поэтому удобнее пользоваться величиной, называемой рабочей чувствительностью установки Q_p :

$$Q_p = F_n / D \Pi. \quad (1.37)$$

Параметр Q_p определяется численным интегрированием с использованием статической чувствительности и кривой скорости счета в зависимости от таких факторов, как продолжительность облучения и выдержка для конкретных условий сепаратора и заданных массы рудных кусков и продолжительности регистрации.

Рабочая чувствительность выражается в импульсах на 1 г полезного компонента и единицу мощности пучка, выхода частиц из источника или плотности потока частиц.

Процесс сепарации полезных ископаемых ядернофизическими методами, как и процессы всех других обогатительных методов, связанных с переработкой (движением) огромного количества разнообразных рудных частиц, является статистическим процессом. Статистический характер процессов сепарации в первую очередь определяется статистическим характером всех ядерных процессов и взаимодействий, разнообразием форм и размеров кусков руды, распределением полезного и других компонентов в рудных кусках, нестабильностью траекторий движения кусков и т. п.

Анализ статистического характера распада радиоактивных элементов в применении к обогащению радиоактивных руд радиометрическим методом подробно освещен в работах [33, 50] и в дальнейшем изложении использован и для характеристики статистических условий процесса регистрации излучения при ядернофизических методах сепарации минерального сырья. При реализации этих методов мы имеем дело с относительно небольшим количеством регистрируемых частиц (обычно менее 100). В этих условиях оценка вероятности отбора кусков в концентрат производится на основе закона нормального распределения Гаусса, а при числе регистрируемых частиц менее 20 — на основе распределения Пуассона [26]. В случае, если распределение импульсов соответствует закону Гаусса, вероятность отбора рудного куска с заданной массой и известным количеством полезного компонента можно определить с учетом статистических условий регистрации излучения рудных кусков (рис. 1.20) [33].

На графике показаны средний уровень регистрируемых радиометром импульсов $F = F_n + F_\phi$ и область возможных статистических отклонений от общего среднего числа регистрируемых импульсов $[(F + R\sqrt{F}) \div (F - R\sqrt{F})]$, а также область появления фоновых импульсов $[(F_\phi + R_\phi\sqrt{F_\phi}) \div (F_\phi - R_\phi\sqrt{F_\phi})]$, где R и R_ϕ — аргументы функции вероятностей.

Чтобы радиометр сработал только от полезных импульсов и не сработал от импульсов, создаваемых фоновым излучением, необходимо, чтобы настройка радиометра A (порог срабатывания радиометра) была выше, чем максимально возможное значение фоновых импульсов, т. е. необходимо, чтобы [33]

$$F - R\sqrt{F} \geq A \geq F_\phi + R_\phi\sqrt{F_\phi}. \quad (1.38)$$

В пределе

$$F - R\sqrt{F} = A = F_\phi + R_\phi\sqrt{F_\phi}, \quad (1.39)$$

откуда:

$$R = -(A - F)/\sqrt{F}, \quad (1.40)$$

или

$$R = - [A - (F_{\Pi} + F_{\Phi})] / \sqrt{F_{\Pi} + F_{\Phi}} \quad (1.41)$$

и

$$R_{\Phi} = (A - F_{\Phi}) / \sqrt{F_{\Phi}}. \quad (1.42)$$

Так как

$$D = 0,01 q \alpha, \quad (1.43)$$

то при постоянном Π можно написать, что

$$F_{\Pi} = 0,01 q \alpha Q_p \quad (1.44)$$

и соответственно

$$R = - [A - (0,01 q \alpha Q_p + F_{\Phi})] / \sqrt{0,01 q \alpha Q_p + F_{\Phi}}. \quad (1.45)$$

Определяя значения R и R_{Φ} для конкретных условий, можно по специальным таблицам [26] определить вероятность отбора куски в концентрат P и вероятность фоновых срабатываний P_{Φ} и построить вероятностную кривую разделения кусков

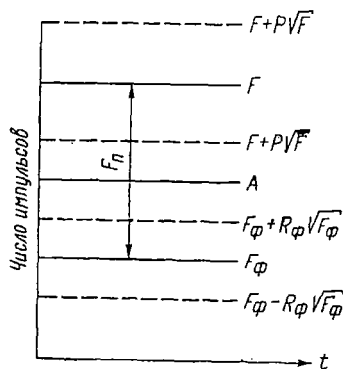


Рис. 1.20. Статистические условия регистрации излучения.

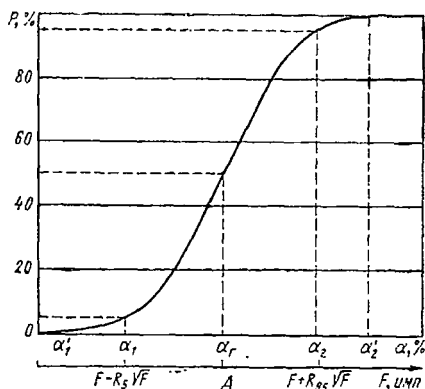


Рис. 1.21. Общий вид кривой разделения.

руды в процессе их сепарации (рис. 1.21). Такая кривая учитывает только статистический характер взаимодействия или распада. Как следует из рис. 1.21, куски руды можно разделить на три группы. Все куски, имеющие содержание полезного компонента меньше, чем α'_1 , не будут отобраны в концентрат и попадут в хвосты, куски с содержанием больше, чем α'_2 , будут отобраны в концентрат, а куски с промежуточным содержанием полезного компонента (от α'_1 до α'_2) разделятся между хвостами и концентратом в соответствии с вероятностной кривой. При этом куски с содержанием полезного компонента α_r разделятся между двумя продуктами точно пополам. Это содержание полезного компонента принято называть граничным содержанием.

Нетрудно увидеть, что участок $\alpha'_2 - \alpha'_1$ характеризует разрешающую способность (селективность) процесса разделения. Чем уже этот участок, тем более четким будет разделение на продукты сепарации. На практике точное определение границ участка $\alpha'_2 - \alpha'_1$ представляет большие трудности. В связи с этим принято определять его границы по точкам, соответствующим содержаниям полезного компонента, при которых куски отбираются в концентрат с вероятностью 5% и 95%. Обозначим величину этого интервала через Δ :

$$\Delta = \alpha_{95} - \alpha_5. \quad (1.46)$$

Расчет величины Δ в зависимости от условий можно производить по формулам, полученным простыми преобразованиями формул (1.39) — (1.45):

$$\Delta = (165 \sqrt{4(D_{50}Q_p + F_\phi)} + 272)/qQ_p, \quad (1.47)$$

или

$$\Delta = (165 \sqrt{4A} + 272)/qQ_p, \quad (1.48)$$

где D_{50} — количество полезного компонента в кусках с массой q , соответствующее граничному содержанию, z .

Как следует из формул (1.47) и (1.48), разрешающая способность сортировочных установок зависит от многих факторов, основные из которых — чувствительность сепаратора, масса кусков, уровень регистрируемого фона и граничное содержание полезного компонента (настройка радиометра). С использованием параметра Δ удобно сравнивать различные режимы сортировки одного и того же сырья на сепараторе.

Для сравнения различных методов обогащения, а также сепараторов удобно применять другой важный параметр — порог чувствительности сепаратора D_0 . Он определяется через количество полезного компонента в куске с массой q , который отбирается в концентрат с вероятностью 95% при уровне фоновых срабатываний 5%:

$$D_0 = (3,3 \sqrt{F_\phi} + 2,72)/Q_p. \quad (1.49)$$

Соответственно порог разрешающей способности Δ_0 (%) равен

$$\Delta_0 = 100D_0/q \quad (1.50)$$

или

$$\Delta_0 = (330 \sqrt{F_\phi} + 272)/qQ_p. \quad (1.51)$$

Следует отметить, что все параметры, определяемые формулами (1.47) — (1.51), зависят еще и от продолжительности регистрации. В неявной форме временной параметр входит в эти формулы через параметры Q_p и F_ϕ , значения которых подстав-

лжаются в формулы для определенной длительности измерения. Кроме того, приведенные рассуждения и формулы действительны для нормального распределения регистрируемых импульсов, что в основном и оправдывается. Если закон распределения другой, полученные формулы требуют уточнения путем определения поправочных коэффициентов или вывода новых формул на основе соответствующего закона распределения. Однако принципиальная сущность процесса достаточно точно выражается приведенными формулами.

Характер влияния чувствительности на вероятность отбора кусков показан на рис. 1.22, на котором изображены кривые разделения для трех значений параметра Q_c . Как видно из графиков, при увеличении параметра Q_c кривые разделения становятся более крутыми с соответствующим улучшением разрешающей способности сепаратора. Аналогичное влияние на кривую разделения оказывают увеличение потока бомбардирующих частиц и уменьшение уровня регистрируемого фонового излучения.

Вероятностный характер процесса проявляется и в связи с неоднородностью кусков по массе и распределению полезного компонента в них, отклонениями траектории отдельных кусков и др. На рис. 1.23 показаны кривые разделения для кусков с массой q_1, q_2, q_3 . Куски с массой q_3 характеризуют наиболее крупные куски в сортируемом классе, куски с массой q_1 — наиболее мелкие, а q_2 соответствует средней массе кусков в перерабатываемом материале. Если сепаратор настроен на отбор с вероятностью 50% кусков с массой q_2 , имеющих граничное содержание полезного компонента, то заштрихованная на рис. 1.23 зона характеризует область разделения кусков руды при сепарации широкого класса крупности. При этом крупные куски отбираются в концентрат при более низком содержании полезного компонента, а мелкие — при значительно более высоком, чем заданное граничное содержание. В результате концентрат разубоживается за счет попадания в него бедных, но крупных кусков, а хвосты обогащаются богатыми мелкими кус-

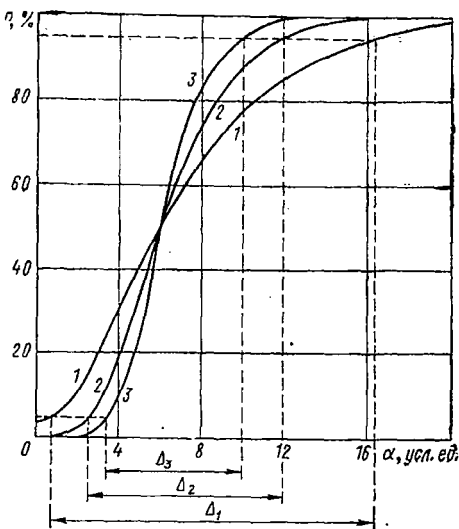


Рис. 1.22. Кривые разделения:
1 — $Q_c = 1,0$; 2 — $Q_c = 2,0$; 3 — $Q_c = 4,0$.

камин руды. Рассмотренный пример наглядно характеризует значение разброса в массе сортируемых кусков. Наблюдающаяся неоднородность кусков руды по форме и распределению в них полезного компонента, а в отдельных случаях и недостаточная проникающая способность первичного или регистрируемого излучения приводят к дополнительному ухудшению разрешающей способности сортировочных установок.

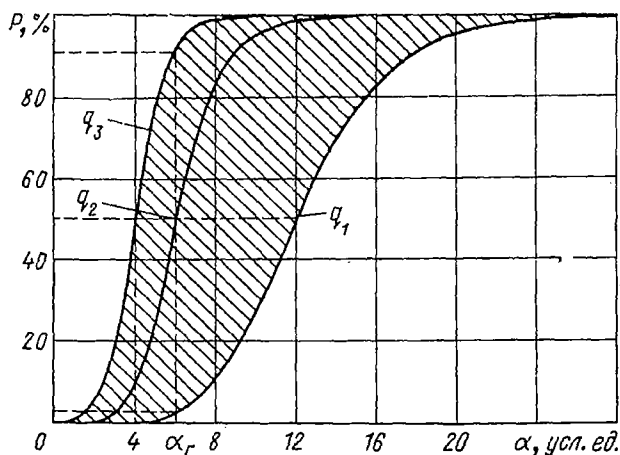


Рис. 1.23. Кривые разделения для кусков с массой q_1, q_2 и q_3 ($q_3 : q_2 : q_1 = 5 : 2 : 1$).

7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Рассмотренные выше условия облучения и регистрации, обеспечиваемые применением соответствующей аппаратуры, сами по себе еще не гарантируют проведения высокоэффективного процесса обогащения, если не будут приниматься во внимание технологические свойства полезных ископаемых, т. е. свойства, которые в той или иной мере оказывают влияние на технологические показатели сепарации минерального сырья. Наибольшее влияние на результаты обогащения оказывает вещественный состав перерабатываемого сырья, его кусковатость, распределение полезного компонента, ядернофизические параметры сырья, соответствие величины регистрируемых эффектов (признаков) содержанию полезного компонента и др. Суммарное влияние всех названных групп факторов определяет тот максимально возможный (теоретический) уровень технологических показателей, который можно получить при обогащении конкретного вида минерального сырья каким-либо из рассматриваемых методов.

Вещественный состав полезных ископаемых. При оценке возможностей ядернофизических методов сепарации большое значение имеет химический состав сырья. Для анализа возмож-

ностей многих методов сепарации, особенно методов III и IV групп, на основе данных общего химического анализа часто рассчитывается также элементный и даже изотопный состав сырья.

При анализе технологических возможностей отдельных ядерно-физических методов обогащения, кроме общей характеристики вещественного состава, наибольшее значение имеет содержание основного полезного и других ценных компонентов. Важность этих характеристик сырья определяется рядом обстоятельств:

1. Как известно, само по себе содержание основного и других ценных компонентов характеризует ценность полезного ископаемого как сырья для получения этих компонентов и во многом определяет конечные технологические и экономические результаты переработки сырья.

2. Содержание полезного компонента в рудах и их вещественный состав в значительной мере определяют общую схему переработки. Переработка бедных руд может быть рентабельной лишь при использовании простых и дешевых методов обогащения. Наоборот, богатые руды часто без предварительного обогащения могут сразу направляться потребителям. Наличие в руде других ценных компонентов, как правило, позволяет снижать экономически оправданное бортовое содержание полезного компонента [54].

3. Содержание полезного компонента, как будет показано в дальнейшем, непосредственно определяет максимально возможные (теоретические) показатели обогащения, например выход хвостов и т. п., по каждому конкретному типу руды независимо от применяемых методов сепарации.

В отдельных случаях большое влияние на эффективность сепарации может оказать вид корреляционной связи между основным и другими ценными компонентами, находящимися в руде. Изучение таких связей — необходимый этап в исследованиях вещественного состава при оценке технологических возможностей переработки руд многими из ядерно-физических методов.

Кусковатость характеризует состав руды по геометрическим параметрам составляющих ее кусков. Наиболее важные параметры единичных кусков: максимальные размеры (длина, ширина и толщина), средний размер (диаметр), площадь поперечного сечения, форма, объем, плотность и масса. За основу расчета размеров единичных кусков обычно берут [2, 10, 71, 81] максимальные длину куска a , ширину b и толщину c ; средний размер куска определяют по формуле

$$d = (a + b + c)/3. \quad (1.52)$$

Характеристикой формы куска может быть отношение его фактической массы к массе параллелепипеда со сторонами a ,

b и c или, что то же самое, отношение фактического объема куска к объему параллелепипеда со сторонами a , b и c . Этот показатель можно назвать коэффициентом полноты кусков K_{Π} :

$$K_{\Pi} = q/abc\rho = V/abc, \quad (1.53)$$

где q и V — фактические масса и объем куска.

Показатель K_{Π} может изменяться в пределах от 0 до 1. При $K_{\Pi}=1$ фактическая форма куска практически совпадает с формой параллелепипеда, определяемой размерами a , b и c . Чем меньше показатель K_{Π} , тем менее форма куска соответствует форме параллелепипеда. Среднее значение K_{Π} для большинства руд находится в пределах 0,4—0,6. По отдельным кускам этот показатель изменяется от 0,1—0,2 до 0,8—0,95.

В некоторых разновидностях ядернофизических методов важное значение имеет площадь поперечного сечения кусков S_{κ} :

$$S_{\kappa} = K_c x_1 x_2, \quad (1.54)$$

где x_1 и x_2 — максимальные размеры куска в двух любых взаимно перпендикулярных направлениях; K_c — коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально (K_c обычно равен 0,6—0,8).

Важнейшая характеристика кусковатости — гранулометрический состав (ситовая характеристика) сырья, т. е. распределение кусков руды в зависимости от их средних размеров. Гранулометрический состав руд определяют обычно при помощи грохотов или сит, а результаты изучения представляются в табличной или графической форме [2, 10]. Рассматриваемыми методами перерабатываются только определенные классы крупности полезных ископаемых. Нижний предел сортируемых классов при использовании различных методов колеблется от 30(20) до 5(3) мм, а верхний — от 50(100) до 200(300) мм. Более крупные куски, имеющиеся в рудах, обычно дробят до требуемых размеров. В связи с этим гранулометрический состав непосредственно определяет долю руды, которая поступает на переработку ядернофизическими способами. В зависимости от различных факторов значение этой доли колеблется от 30—40 до 80—90%. Однако важен не только абсолютный выход сортируемых классов, но и соотношение выходов более узких классов в интервале сортируемых. Это связано с тем, что эффективность и производительность сепарации существенно меняются с изменением крупности перерабатываемых классов. Поэтому для сепарации наиболее благоприятны руды, имеющие относительно большой выход классов, легко обогатимых данным методом.

При реализации отдельных методов сепарации большое влияние на результаты переработки оказывают и другие геометрические параметры кусков руды. Так, например, при абсорбционных методах обогащения необходимо учитывать тол-

шину кусков. При использовании методов, основанных на регистрации рассеянного излучения, важны форма поверхности рудных образцов и ее размеры. Во многих методах сепарации (активационных и др.) необходимо учитывать поперечные сечения кусков и другие их параметры. В таких случаях кроме изучения гранулометрического состава руд, которое является обязательным элементом при оценке обогатимости руд любым

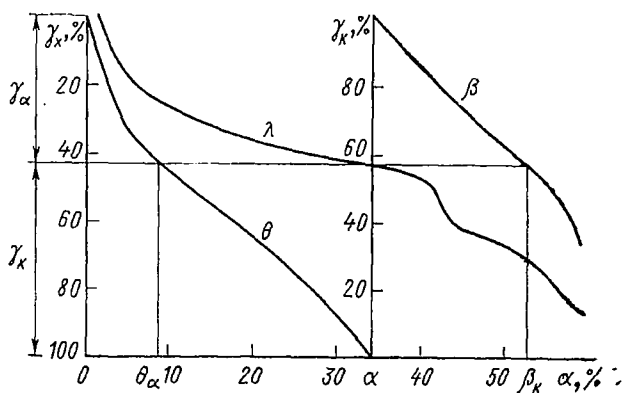


Рис. 1.24. Кривые контрастности руды.

из ядернофизических методов, необходимо проводить исследование соответствующих параметров кусков перерабатываемого сырья.

Характеристики распределения полезного и других компонентов в руде во многом определяют технологические возможности ядернофизических методов обогащения. Наибольший интерес представляет изучение закономерностей распределения полезного компонента между отдельными классами крупности, между кусками руды в отдельных классах крупности и в пределах самих кусков руды.

Степень различия кусков по содержанию в них полезного компонента (контрастность руды) [50] — важнейшее свойство руд — во многом определяет возможности их обогащения. Для определения характеристики контрастности от изучаемых классов крупности отбирают пробы, каждый кусок которых взвешивают и анализируют для определения содержания полезного компонента. Часто куски с близкими содержаниями полезного компонента объединяют в отдельные группы (фракции) с определенным их весового выхода. На основе полученных данных составляют характеристики контрастности, которые могут быть представлены в виде таблиц (табл. 1.6) или графиков (рис. 1.24). Для количественной оценки степени контрастности предложены различные показатели контрастности [33, 50, 62]. Наиболее распространен показатель M , представляющий со-

Характеристика контрастности мелкокрапленных флюоритовых руд
(класс—35+25 мм), %

Фракция	Пределы содержания флюорита, %	Частные показатели			Суммарные показатели					
		выход	содержание флюорита	извлечение	сверху (хвосты)			снизу (концентрат)		
					выход	содержание флюорита	извлечение	выход	содержание флюорита	извлечение
1	0—5	21,4	2,9	1,8	21,4	2,9	1,8	100,0	34,1	100,0
2	5—10	8,4	8,2	2,0	29,8	3,8	3,8	70,2	46,6	96,2
3	10—20	7,7	16,2	3,7	37,5	6,8	7,5	62,5	50,5	92,5
4	20—30	4,5	26,2	3,5	42,0	8,9	11,0	58,0	52,3	89,0
5	30—40	6,0	37,5	6,6	48,0	12,5	17,6	52,0	53,9	82,4
6	40—50	17,6	43,6	22,4	65,6	21,0	40,0	34,4	59,0	60,0
7	Более 50	34,4	59,0	60,0	100,0	34,1	100,0	—	—	—
	Всего	100,0	34,1	100,0						

бой среднее относительное отклонение содержания полезного компонента в кусках руды от среднего содержания его в сортируемом классе. Его можно определять по одной из следующих формул [50]:

$$M = \frac{\sum [(\beta_i - \alpha) \gamma_i]}{\alpha}; \quad (1.55)$$

$$M = 2\gamma_\alpha \left(1 - \frac{\Theta_\alpha}{\alpha}\right); \quad (1.56a)$$

$$M = 2\gamma_k \left(\frac{\beta_k}{\alpha} - 1\right), \quad (1.56b)$$

где β_i — содержание полезного компонента в отдельных кусках или фракциях, %; γ_i — доля массы отдельных кусков (фракций) в общей массе пробы, доли единицы; γ_α , Θ_α , γ_k , β_k — соответственно выход отвальных фракций, содержание в них полезного компонента, выход концентратных фракций и содержание в них полезного компонента при граничном содержании полезного компонента, равном α .

Формулу (1.55) используют для расчета показателя M по первичным материалам, характеризующим содержание полезного компонента в отдельных кусках (фракциях). Формулы (1.56) выражают связь показателя M с кривыми контрастности. Значения всех параметров, входящих в формулы, снимают с этих кривых (см. рис. 1.24). Значение показателя M изменяется от 0 до 2,0. Вопросы его использования для некоторых технологических расчетов и связи с другими показателями обогатимости руд подробно рассмотрены в работе [50].

Характеристика контрастности определяет максимально возможные технологические показатели обогащения руды независимо от метода их сепарации. При обработке материалов по контрастности различных типов руд установлено, что по рудам каждого месторождения теоретические показатели сепарации сырья (при данной степени его контрастности) в основном определяются содержанием полезного компонента в руде. При достаточном количестве фактических данных для каждого типа

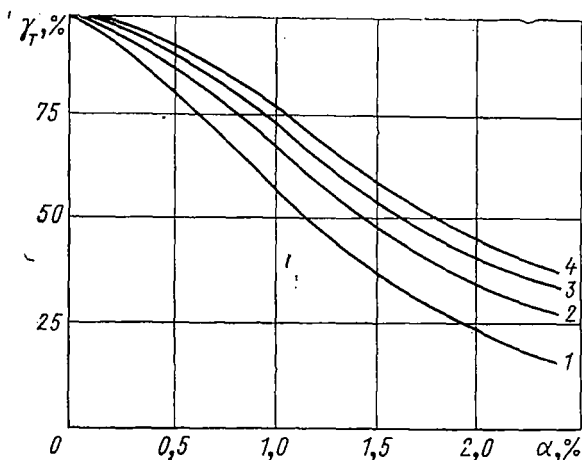


Рис. 1.25. Зависимость теоретического выхода отвалных фракций от содержания полезного компонента в сортируемом классе:

1, 2, 3 и 4 — содержание полезного компонента (%) в отвалных фракциях соответственно 0,02; 0,060; 0,100 и 0,110.

руды, как правило, можно установить статистические зависимости, аналогичные приведенным на рис. 1.25. Использование таких графиков позволяет проводить более объективную сравнительную оценку результатам сепарации сырья с неодинаковым содержанием полезного компонента и прогнозировать показатели обогащения руд того же месторождения, но с другими содержаниями компонента.

Для оценки обогатимости руд необходимо учитывать и распределение компонента между классами крупности, поскольку технологические показатели сепарации отдельных классов определяются также и содержанием в них полезного компонента. Характеристики таких распределений в зависимости от типа месторождений, их генезиса и других горно-геологических особенностей могут существенно различаться. Условно можно выделить три основных вида распределения, характеризующихся повышенным содержанием компонента в крупных классах, равномерным его распределением по всем классам, повышенным содержанием компонента в мелких классах крупности.

При равномерном распределении теоретические показатели обогащения по отдельным классам крупности практически одинаковы. Это справедливо в отсутствие заметной связи между степенью раскрытия минералов и крупностью кусков, что, как правило, и наблюдается при исследовании кусков крупнее 50 (25) мм. При неравномерном распределении компонента теоретические показатели обогащения по отдельным классам крупности будут различаться, и тем заметнее, чем больше различие между ними по содержанию компонента. В связи с этим степень неравномерности распределения компонента может в значительной мере влиять на общие технологические показатели руды, в частности на выход хвостов, потери полезного компонента в целом от исходного сырья и эффективность сепарации.

Определенное влияние на эффективность сепарации руд оказывает характер распределения полезного и других компонентов в пределах самих кусков руды. Этот вопрос изучен недостаточно. Отметим только, что влияние этого фактора тем заметнее, чем более неравномерно распределен компонент в кусках руды, чем менее проникающим является первичное или вторичное излучение и чем крупнее сортируемые куски.

Свойства горных пород и руд по отношению к излучениям (ядернофизические параметры руд) прежде всего определяются вещественным составом, а также плотностью и другими их физическими характеристиками [72].

Таблица 1.7

Пробег β -частиц (мм) в горных породах и рудах (по данным работы [72])

Среда	$\rho, \text{ г/см}^3$	$E_{\beta}, \text{ Мэв}$			
		0.5	1.0	5.0	10.0
Вода	1,00	1,75	4,50	25,0	49,0
Уголь каменный	1,30	1,35	3,46	19,2	37,7
Глина	2,10	0,83	2,14	11,9	23,3
Песчаник	2,30	0,76	1,95	10,8	21,3
Известняк	2,65	0,66	1,70	9,4	18,5
Гранит	2,73	0,63	1,62	9,0	17,6
Диабаз	3,05	0,57	1,47	8,2	16,1
Барит	4,45	0,39	1,01	5,6	11,0
Гематит	5,10	0,34	0,88	4,9	9,6
Галенит	7,50	0,23	0,60	3,3	6,5

Так, по отношению к β -излучению важен такой параметр, как максимальный пробег β -частиц в руде. Длина пробега обратно пропорциональна плотности и возрастает с увеличением начальной энергии частиц (табл. 1.7). Максимальный пробег β -частиц R_M с энергией до 3 Мэв можно рассчитать по формуле

$$R_M = \frac{0,11}{\rho} \left(\sqrt{1 + 22,4E_{\beta}^2} - 1 \right), \quad (1.57)$$

а для электронов с энергией выше 1 Мэв используют выражение

$$R_m = (0,571E_\beta - 0,161) \rho^{-1}. \quad (1.58)$$

Важнейшие параметры полезных ископаемых, характеризующие их свойства по отношению к γ -излучению, — коэффициент ослабления γ -излучения в породе μ , эффективный атомный номер $Z_{\text{эф}}$, эффективная атомная масса вещества породы $A_{\text{эф}}$ и др. [72, 74]

$$\mu = \sum_1^{i=m} \rho_i \mu_i. \quad (1.59)$$

Для энергии γ -квантов, превышающей уровень K -скачков,

$$Z_{\text{эф}} \approx \sqrt[3]{\sum_1^{i=m} \rho_i Z_i^3}. \quad (1.60)$$

Для области энергий γ -квантов, в которой преобладает комптоновское рассеяние (от долей до нескольких мегаэлектрон-вольт):

$$Z_{\text{эф}} = \sum_1^{i=m} \rho_i Z_i; \quad (1.61)$$

$$A_{\text{эф}} = 2Z_{\text{эф}}/\alpha_\gamma; \quad (1.62)$$

$$\alpha_\gamma = 2 \sum_1^{i=m} \frac{Z_i}{A_i} \cdot \frac{P_i}{100}, \quad (1.63)$$

где Z_i и A_i — порядковый номер и массовое число i -го элемента породы (руды); ρ_i — весовое количество i -го элемента, %; m — общее число элементов в породе (руде).

Характеристика некоторых параметров минералов и пород, определяющих их свойства по отношению к γ -излучению, дана в табл. 1.8 [72, 74]. Свойства полезных ископаемых по отношению к нейтронам характеризуются эффективными макросечениями поглощения Σ_a , рассеяния Σ_s и активации $\Sigma_{\text{акт}}$. Значение этих параметров в основном определяются вещественным составом пород и руд и энергией нейтронов. Для вещества, состоящего из однопородных ядер, макросечение данной реакции (или процесса) определяют по формуле

$$\Sigma = n\sigma, \quad (1.64)$$

где n — число ядер в 1 см³ вещества ($n = \rho A_0/A$).

Для вещества, состоящего из разных элементов [32],

$$\Sigma = \sum_1^{i=m} n_i \sigma_i = \frac{\rho A_0}{100} \sum_1^{i=m} \frac{\beta_i \sigma_i}{A_i}, \quad (1.65)$$

где A_i , β_i , σ_i — соответственно массовое число, процентное содержание в веществе и микросечение i -го элемента.

Таблица 1.8

Средние значения параметров, определяющих свойства некоторых минералов и пород по отношению к γ -излучению

Среда	Плотность, г/см ³	Z _{эф}	A _{эф}	α_γ	μ (см ² /г) при энергиях γ -квантов (Мэв)		
					0,05	0,5	5,0
Вода	1,0	7,42	13,36	1,12	0,212	0,097	0,030
Уголь каменный	1,30	6,92	13,38	1,038	0,184	0,092	0,028
Песчаник	2,30	12,39	24,7	1,002	—	—	—
Глина	2,10	13,07	26,1	1,002	0,355	0,087	0,028
Доломит	2,67	13,80	27,67	0,997	0,366	0,087	0,028
Известняк	2,75	15,13	30,26	1,0	0,488	0,087	0,029
Гранит	2,78	13,64	27,6	0,987	0,346	0,087	0,029
Диабаз	3,05	15,92	32,2	0,989	—	—	—
Гематит	5,10	23,0	48,6	0,946	1,34	0,084	0,030
Барит	4,45	45,6	102,0	0,892	8,74	0,092	0,033
Галенит	7,50	77,2	172,5	0,895	4,57	0,137	0,041

В табл. 1.9 приведены значения макросечений поглощения и рассеяния для некоторых пород и минералов. Сведения о макросечениях активации некоторых типов руд даны в следующей главе при рассмотрении нейтронно-активационных методов. Приведенные материалы не отражают всего разнообразия ядернофизических параметров пород, руд и составляющих их минералов. По мере развития новых методов сепарации число параметров, характеризующих ядерные свойства сырья и полнота сведений о их количественных значениях, неизбежно должны возрастать.

Соответствие величины регистрируемого признака и содержания полезного компонента. Рассмотренные основные технологические свойства полезных ископаемых во многом определяют возможность и эффективность переработки минерального сырья ядернофизическими методами. Но само по себе даже благоприятное сочетание всех этих свойств не дает гарантии успешного проведения сепарации, если не будет выполнено еще одно из важнейших условий проведения процесса обогащения:

Таблица 1.9

Параметры Σ_a и Σ_s для некоторых пород и минералов [32, 72]

Порода, минерал, вещество	Плотность, г/см ³	Σ_a' , см ⁻¹	Σ_s' , см ⁻¹	Порода, минерал, вещество	Плотность, г/см ³	Σ_a' , см ⁻¹	Σ_s' , см ⁻¹
Уголь каменный	1,35	0,015	2,50	Кальцит	2,72	0,0071	0,432
Глина сухая	1,88	0,0051	0,3	Доломит	2,85	0,0046	0,441
Песок сухой	2,3	0,0093	1,0	Корунд	4,0	0,0102	0,364
Кварц	2,65	0,0034	0,268	Гематит	5,1	0,0980	0,666

требуется высокая степень соответствия между числом регистрируемых импульсов (средней скоростью их счета) и содержанием полезного компонента в кусках руды.

Практически во всех процессах обогащения полезных ископаемых разделение рудных частиц на продукты происходит не по содержанию полезного компонента, а по какому-либо признаку (плотности, магнитной восприимчивости, размерам кусков и другим параметрам обогащаемых руд. При сепарации ядернофизическими методами полезные ископаемые разделяются также не по содержанию полезного компонента, а по плотности потока излучения, направленного от куска руды в сторону детектора излучения. Если между зарегистрированным потоком частиц и содержанием полезного компонента наблюдается достаточно тесная корреляционная связь, то сепарация будет производиться в основном по содержанию полезного компонента.

Пропорциональность между потоком регистрируемого излучения и содержанием компонента может нарушаться в результате таких явлений, как различие кусков по массе, форме и размерам, недостаточная проникающая способность первичного или регистрируемого излучения, самопоглощение излучения в кусках, неравномерность потока бомбардирующих частиц, наличие мешающего и фонового излучений, спектральная характеристика детектора излучения, неравномерность распределения полезного компонента в пределах кусков руды, и т. п. В результате их воздействия функциональная связь между значениями регистрируемого признака и содержанием полезного компонента переходит в статистическую, корреляционную, т. е. такую связь, когда каждому определенному значению содержания компонента может соответствовать несколько различных значений, например, количества регистрируемых радиометром электрических импульсов. При наличии причинной зависимости теснота корреляционной связи между зарегистрированной величиной признака и содержанием полезного компонента может быть выражена через коэффициент корреляции.

Для определения связи между рассматриваемыми величинами необходимо в условиях, при которых будут производиться облучение и сепарация сырья, определить значение регистрируемого признака для кусков, представляющих в целом сортируемый класс, в каждом из которых должно быть определено содержание полезного компонента. Полученные данные могут быть использованы для построения кривых обогатимости и для расчета коэффициента корреляции и определения уравнения связи. В отличие от кривых контрастности, строящихся при группировке кусков по содержанию в них полезного компонента, кривые обогатимости строят на основе группировки кусков по числу импульсов, регистрируемых радиометром [50]. Кривые обогатимости определяют максимально возможные техно-

логические показатели обогащения руды для конкретного метода сепарации. Анализ и сопоставление кривых контрастности и обогатимости позволяют оценить суммарное влияние на результаты сепарации факторов, определяющих степень соответствия регистрируемого признака содержанию полезного компонента.

Степень соответствия признака содержанию компонента и оценка влияния на ее величину отдельных факторов (например, неравномерности кусков руды по их массе) могут быть изучены и с помощью корреляционного анализа. Для этого первичные экспериментальные материалы должны быть обработаны по методикам, изложенным, например, в работах [26, 28]. Проведение корреляционного анализа позволяет определить ряд статистических параметров, таких, как коэффициент корреляции или корреляционное соотношение, ширина полосы разброса признака, коэффициенты регрессии и др., а также установить уравнения связи между рядами исследуемых величин. Уравнения связи могут быть использованы при анализе возможностей сепарации полезных ископаемых, а также для введения коррекции (см. разд. 1.5) в регистрируемую величину признака (в зависимости от степени влияния отдельных факторов) для обеспечения более эффективного обогащения сырья.

ОСНОВНЫЕ ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СЕПАРАЦИИ

Последовательность описания отдельных ядернофизических методов сепарации полезных ископаемых дана в соответствии с их классификацией (см. табл. 1.3). Однако вследствие ограниченности объема книги, по каждой выделенной группе методов подробно описывается только один, наиболее развитый метод и лишь в отдельных случаях излагаются основы других методов сепарации данной группы.

1. АБСОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

Физические основы γ -абсорбционного метода

При γ -абсорбционном методе отдельные куски облучаются коллимированным пучком γ -квантов. Часть этих квантов в результате поглощения или рассеяния будет удалена из общего потока излучения. Зависимость линейного коэффициента ослабления μ от энергии γ -квантов, составленная по материалам работы [74], приведена на рис. 2.1.

Из графика видно, что резкое различие в поглощающей способности веществ наблюдается лишь при энергиях γ -квантов менее 0,1—0,3 Мэв. При дальнейшем увеличении энергии коэффициенты ослабления для отдельных сред различаются незначительно.

Допустим, что горнорудная масса, предназначенная для сепарации γ -абсорбционным методом, представляет собой смесь кусков одинаковой формы толщиной d , каждый из которых состоит либо из породы, либо из полезного минерала. Куски породы имеют плотность $\rho_{\text{п}}$ и массовый коэффициент ослабления $\mu_{\text{мп}}$. Рудные куски характеризуются соответственно параметрами $\rho_{\text{р}}$ и $\mu_{\text{мр}}$. Тогда поток излучения, прошедшего через эти куски, будет равен:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\text{п}} &= \Phi_0 \exp(-\mu_{\text{мп}}\rho_{\text{п}}d), \\ \Phi_{\text{р}} &= \Phi_0 \exp(-\mu_{\text{мр}}\rho_{\text{р}}d). \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Ослабление γ -излучения при прохождении через среду происходит в основном в результате фотоэффекта, эффекта Комптона и эффекта образования пар. Массовые коэффициенты ослабления излучения за счет этих эффектов (τ , σ и κ) определяются соответственно [78]:

$$\left. \begin{aligned} \tau &\approx f_1(E) Z^4/A, \\ \sigma &\approx f_2(E) Z/A, \\ \kappa &= f_3(E) Z^2/A, \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

а полный массовый коэффициент ослабления μ_m равенством

$$\mu_m = \tau + \sigma + \kappa, \quad (2.3)$$

где $f_1(E)$, $f_2(E)$, $f_3(E)$ — коэффициенты, зависящие от энергии γ -излучения; Z и A — порядковый номер и массовое число элемента.

Для оценки возможностей использования этих эффектов для сепарации руд рассмотрим отношение потоков моноэнергетических γ -квантов, прошедших куски руды или породы одинаковой толщины, т. е.

$$\frac{\Phi_p}{\Phi_p} = \exp [(\mu_{mp} \rho_p - \mu_{mp} \rho_p) d]. \quad (2.4)$$

Это отношение можно назвать показателем сравнительного ослабления пучка (показатель K).

Зависимость показателя K для различных эффектов от свойств

вещества определяется выражением [78]:

$$\left. \begin{aligned} K_\tau &= \exp \left[\left(\frac{\rho_p Z_p^4}{A_p} - \frac{\rho_p Z_p^4}{A_p} \right) f_1(E) d \right]; \\ K_\sigma &= \exp \left[\left(\frac{\rho_p Z_p}{A_p} - \frac{\rho_p Z_p}{A_p} \right) f_2(E) d \right]; \\ K_\kappa &= \exp \left[\left(\frac{\rho_p Z_p^2}{A_p} - \frac{\rho_p Z_p^2}{A_p} \right) f_3(E) d \right], \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где Z_p , A_p , Z_p , A_p — средние порядковые номера и средние массовые числа руды и породы.

Анализ формул (2.5) показывает, что показатель K имеет наибольшие значения при использовании фотоэффекта. Наи-

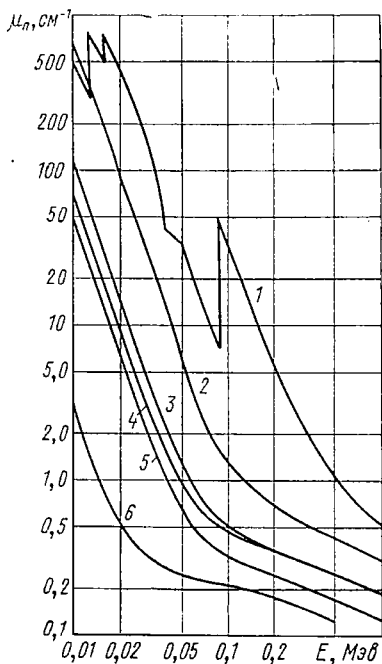


Рис. 2.1. Зависимость линейного коэффициента поглощения от энергии γ -излучения:

1 — галенит; 2 — магнетит; 3 — известняк; 4 — гранит; 5 — глина; 6 — каменный уголь.

меньшее влияние на величину K оказывает комптон-эффект, так как отношения Z_p/A_p и Z_n/A_n для большинства руд и пород близки к 0,5. Промежуточные значения коэффициента K имеет при использовании эффекта образования пар, проявляющегося при энергиях γ -квантов выше 1,02 Мэв. Кроме перечисленных эффектов заметное влияние на результаты сепарации могут оказывать различия в плотности кусков породы и руды в особенности, когда ослабление пучка излучения происходит в результате комптон-эффекта.

Таким образом, если определяющим процессом взаимодействия γ -квантов с веществом является фотоэффект, то сепарацию руд можно осуществлять по ослаблению пучка первичного излучения в зависимости от среднего атомного номера руды (γ -абсорбционный элементный метод сепарации). Этот метод основан на использовании резкой зависимости коэффициента фотоэлектрического поглощения от атомного номера среды, так как $\tau \approx f(Z^4)$. Если определяющим является комптон-эффект, то куски можно разделить по их плотности, т. е. по ослаблению излучения в зависимости от плотности разделяемых кусков (γ -абсорбционный плотностной метод сепарации минерального сырья).

С учетом данных, приведенных на рис. 2.1, можно считать, что γ -абсорбционный элементный метод применим при энергии первичного излучения до 0,2—0,3 Мэв, а γ -абсорбционный плотностной метод — при энергии γ -излучения от 0,5 до 1,5—2,5 Мэв.

Из рассмотренных разновидностей метода в последние годы успешно развивается γ -абсорбционный элементный метод сепарации полезных ископаемых. Физические основы этого метода и ряд других вопросов изложены в работах [4—7, 11, 12, 14, 19—24, 29, 44—46, 49, 53, 55, 64—66, 78, 79, 83, 96]. К природным факторам, определяющим чувствительность и селективность метода, относятся элементный (вещественный) состав кусков, в особенности наличие в них тяжелых элементов, кусковатость перерабатываемого сырья, в частности форма и размеры кусков и др. Действие этих факторов определяет степень ослабления первичного излучения, прошедшего через куски полезных ископаемых. В качестве источников излучения при сепарации руд обычно используют изотопные источники γ -излучения или рентгеновские трубки. Правильный выбор источника имеет очень большое значение, так как этим определяется величина коэффициента ослабления γ -излучения.

Для кусков породы и руды потоки ослабленного излучения равны

$$\Phi_{II} = \Phi_0 \exp(-\mu_n d_n); \quad (2.6a)$$

$$\Phi_p = \Phi_0 \exp(-\mu_p d_p), \quad (2.6b)$$

где $\mu_{\text{п}}$ и $\mu_{\text{р}}$ — линейные коэффициенты ослабления излучения в кусках породы и руды.

Показатель сравнительного ослабления потока K определяют по формуле:

$$K = \Phi_{\text{п}}/\Phi_{\text{р}} = \exp(-\mu_{\text{п}}d_{\text{п}} + \mu_{\text{р}}d_{\text{р}}).$$

Если $d_{\text{п}} = d_{\text{р}}$, то

$$K = \exp[(\mu_{\text{р}} - \mu_{\text{п}})d] = \exp(\Delta\mu d), \quad (2.7)$$

где

$$\Delta\mu = \mu_{\text{р}} - \mu_{\text{п}}. \quad (2.8)$$

В зависимости от значений $\mu_{\text{р}}$ и $\mu_{\text{п}}$ параметр $\Delta\mu$ может быть со знаком $+$ или $-$. Например, при сортировке угля от породы значение $\Delta\mu$ отрицательное, при сепарации железных руд — положительное. При положительном значении $\Delta\mu$ показатель K может изменяться от 1 до ∞ , а при отрицательном — от 1 до нуля.

В практически возможных случаях показатель K изменяется от $-5,0$ ($-10,0$) до $+5,0$ ($10,0$) см^{-1} , а колебания среднего размера сортируемых кусков находятся в пределах от долей сантиметра до $20-30$ см .

Как следует из формулы (2.7), показатель K определяется произведением $(\Delta\mu d)$. Это означает, что одному и тому же значению K может удовлетворять ряд значений $\Delta\mu_i$ и соответствующих ему значений d_i , равных $d_i = \Delta\mu d / \Delta\mu_i$. При заданном значении K и известном $\Delta\mu$, пользуясь уравнением (2.7), можно определить минимальный размер кусков, которые в данных условиях целесообразно подвергать сепарации. И наоборот, задаваясь определенным размером кусков и показателем K , можно определить величину $\Delta\mu$, необходимую для их успешной сепарации. Отметим, что все это справедливо для случая, когда сырье состоит из кусков одинакового размера, и каждый из них состоит только из породы или ценного компонента. В реальных условиях минеральное сырье состоит из кусков, различных по размерам; каждый кусок может включать прослойки породы и ценного компонента. В результате при сортировке узких классов крупности фактический размер (толщина) кусков будет колебаться в определенных пределах от его среднего значения, а различие между параметрами $\mu_{\text{р}}$ и $\mu_{\text{п}}$ оказывается менее определенным, так как сепарации подвергаются куски с самым различным содержанием полезного компонента.

Предварительную оценку величины $\Delta\mu$ можно провести, используя кривые контрастности, по которым для заданного граничного содержания определяют среднее содержание полезного компонента в хвостах и концентрате. Затем с учетом вещественного состава этих продуктов и энергии используемого γ -излучения (или используя зависимость параметра μ от содержа-

ния в сырье полезного компонента) рассчитывают значения μ_d и μ_p , а затем и $\Delta\mu$. За величину d в этих расчетах лучше принимать средний размер куска, определяемый по формуле (1.52), так как в процессе перемещения в зоне облучения кусок может облучаться с любой стороны. Повторяя аналогичные расчеты для различных значений граничного содержания и энергий γ -излучения, можно ориентировочно определить условия, при которых параметр $\Delta\mu$ будет иметь наиболее высокие значения.

Минимальный размер частиц, которые при данных энергии γ -излучения и вещественном составе сортируемых кусков могут быть успешно разделены в процессе сепарации, ориентировочно определяют, используя уравнение (2.7). Результаты таких расчетов сведены в табл. 2.1. Анализ приведенных матери-

Таблица 2.1

Ориентировочная минимально возможная граница сортируемых классов крупности (mm) в зависимости от значения $\Delta\mu$ и допустимых величин показателя K

Допустимые значения показателя K	$\Delta\mu, cm^{-1}$							
	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	2,0	3,0	5,0
1,5	36	13	7	5	5	5	5	5
2,0	64	23	13	10	7	5	5	5
3,0	105	37	22	16	11	6	5	5
5,0	159	54	31	23	16	9	5	5
7,0	193	65	38	29	19	10	6	5
10,0	200	77	45	33	23	12	8	5
30,0	200	113	67	49	33	17	11	7

алов показывает, что при постоянном значении параметра $\Delta\mu$ снижение требований к значению показателя K позволяет существенно опускать границу сортируемых классов. При этом чем больше $\Delta\mu$, тем меньше может быть нижняя граница сортируемых классов. Практически в настоящее время сортируются классы крупнее 50 (25) mm , а значение показателя K при выбранных условиях обычно находится в пределах 3—5. Дальнейшего снижения крупности сортируемых классов можно достигать более совершенным подбором энергии γ -излучения или создания таких условий, при которых сепарация могла бы осуществляться при меньших значениях показателя K (учет толщины кусков и др.).

В принципе чем больше размер кусков, тем больше при данном значении $\Delta\mu$ будет показатель K . Однако при очень больших размерах абсолютные значения величин Φ_{Π} и Φ_p [форму-

лы (2.6)] могут оказаться ниже порога чувствительности рёгги-стрирующей аппаратуры. Кроме того, с ростом размеров кусков (при определенной крупности самих минеральных включений) среди них будет увеличиваться число сростков. В результате степень различия кусков по поглощающей способности может резко уменьшиться, что приведет к невозможности сепарации данного класса крупности. В связи с этим верхний предел крупности сортируемых классов необходимо выбирать с учетом текстурно-структурных особенностей рудной массы, вещественного состава и характеристики имеющихся γ -источников.

Известны примеры сортировки с различным верхним пределом крупности. Так, при обогащении железных руд [44] и углей [96] перерабатывают классы соответственно мельче 200 и 150 мм; по рудам цветных металлов верхнюю границу сортируемых классов оценивают равной 75—90 мм [4—6].

Рассмотрим вопрос о возможном диапазоне сортируемых классов крупности при различных условиях сепарации. Пусть определенным по кривым обогатимости содержаниям полезного компонента в концентрате и хвостах соответствуют коэффициенты линейного ослабления μ_k и μ_x , тогда при среднем размере кусков d можно записать

$$\begin{aligned}\Phi_x &= \Phi_0 \exp(-\mu_x d_x); \\ \Phi_k &= \Phi_0 \exp(-\mu_k d_k).\end{aligned}\quad (2.9)$$

Если на сепарацию поступает класс с нижней границей кусков $d_{н.к}$, а с верхней — $d_{в.к}$, то возможны следующие крайние случаи:

$$\begin{aligned}\Phi_{в.х} &= \Phi_0 \exp(-\mu_x d_{в.х}); \\ \Phi_{н.х} &= \Phi_0 \exp(-\mu_x d_{н.х}); \\ \Phi_{в.к} &= \Phi_0 \exp(-\mu_k d_{в.к}); \\ \Phi_{н.к} &= \Phi_0 \exp(-\mu_k d_{н.к}).\end{aligned}$$

Для уменьшения влияния размеров кусков на результаты сепарации необходимо, чтобы $\Phi_{в.х} \geq \Phi_{н.к}$, или, что то же:

$$\exp(-\mu_x d_{в.х}) \geq \exp(-\mu_k d_{н.к}),$$

т. е.

$$\mu_k d_{н.к} \geq \mu_x d_{в.х}.$$

Разделим обе части неравенства на $\mu_x d_{н.к}$ и получим

$$\mu_k/\mu_x \geq d_{в.х}/d_{н.к}.$$

Так как $d_x \approx d_k$, то

$$\mu_k/\mu_x \geq d_{в.х}/d_{н.к}.\quad (2.10)$$

Таким образом, при выделении класса крупности для сепарации γ -абсорбционным методом соотношение размеров отвер-

стей на верхней и нижней сетках грохота не должно превышать соотношения $\mu_{н}/\mu_{к}$. Практический предел сортируемых классов крупности в зависимости от различных условий колеблется от 200—75 до 50—20 мм. Для повышения эффективности сепарации необходимо разделять сортируемую часть руды на более узкие классы крупности, что не всегда дает требуемый эффект, или производить переработку различных классов крупности на сепараторах, оснащенных надежной системой учета размеров (толщины) кусков.

К настоящему времени предложено несколько способов учета толщины кусков в процессе сепарации [14, 21, 24, 65, 66]. Один из них основан на одновременном просвечивании каждого из кусков двумя пучками проникающего излучения различной энергии [65]. Энергия γ -квантов первого источника соответствует энергии излучения обычно используемого для данного типа сырья в отсутствие системы учета толщины кусков. Энергия излучения второго источника должна быть меньшей, чем у первого источника. Оба источника могут отличаться выходом γ -квантов. Прибор регистрирует суммарное ослабленное излучение обоих пучков.

Пусть $\Phi_{с.п}$ и $\Phi_{с.к}$ — потоки ослабленного излучения суммы двух пучков излучения после прохождения ими соответственно породных и концентратных кусков одинаковой толщины. Тогда разность $\Delta\Phi = \Phi_{с.п} - \Phi_{с.к}$ характеризует селективность данного метода. Раскрывая величины, входящие в это выражение, можно математически показать (см., например, работу [65]), что применение источников с различной энергией γ -квантов позволяет значительно расширить диапазон сортируемых классов. При этом для обеспечения возможности сепарации наиболее широкого класса крупности необходимо, чтобы разница в энергиях жесткого и мягкого γ -излучений была по возможности большой. При увеличении энергии жесткого излучения рабочая область смещается в сторону больших размеров кусков. Но при этом ухудшается разрешающая способность сепаратора по минимальным размерам кусков, имеющих в сортируемом классе. При уменьшении энергии мягкого излучения резко увеличивается разрешающая способность сепаратора по минимальным размерам кусков, но при этом сужается рабочий диапазон со стороны более крупных кусков.

В другом варианте этого способа регистрируется не суммарное излучение двух пучков, а их разность, которая изменяется в зависимости от вещественного состава кусков [14]. Применение этого варианта также позволяет расширить диапазон сортируемых классов. Так, например, при разделении сланца и известняка с использованием одного пучка γ -излучения с энергией 0,5 Мэв рабочий диапазон находится в пределах от 32 до 42 мм. При использовании двух источников (0,5 и 1,3 Мэв) диапазон сортируемых классов увеличивается и со-

ставляет 32—82 мм. Вместо второго пучка γ -излучения принципиально может быть использован пучок нейтронов.

Некоторые способы, позволяющие учитывать толщину кусков, основаны на использовании систем с компенсирующими устройствами [22, 23]. Такие устройства могут быть основаны на применении поворотных щупов со свинцовым клином, оптических средств, детекторов излучения и т. п. Их назначение — контроль толщины куска и автоматическое внесение соответ-

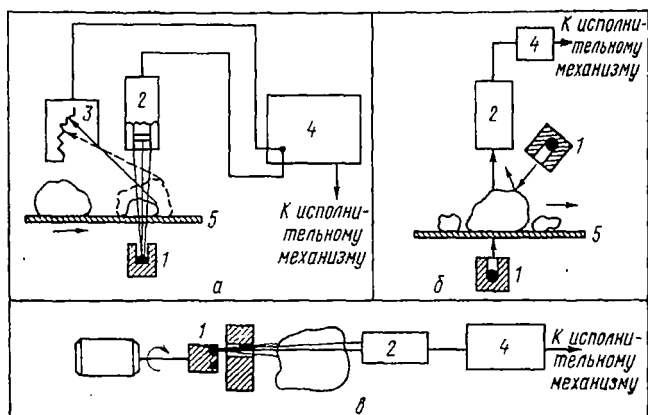


Рис. 2.2. Схемы облучательно-измерительных узлов γ -абсорбционных сепараторов:

1 — контейнер с источниками; 2 — детектор излучения; 3 — электромеханический корректор; 4 — радиометр; 5 — конвейер.

вующих поправок в результаты измерения потока ослабленного излучения. Описания таких устройств имеются в работах [7, 21, 23, 24, 53, 78].

На рис. 2.2 изображены принципиальные схемы некоторых таких устройств. Схема для однолучевого метода (см. рис. 2.2, а) [21] основана на применении электромеханического коллектора с подвижным щупом, положение которого определяется размерами проходящих над ним кусков. Щуп связан с регулирующим устройством какой-либо электрической величины (сопротивления, емкости, индуктивности). Устройство — составная часть измерительной или управляющей части установки — компенсирует влияние неравномерности проходящих кусков.

На рис. 2.2, б [24] показана схема облучательно-измерительного узла сепаратора с системой учета толщины кусков на основе дополнительного верхнего источника излучения. Детектор регистрирует одновременно ослабленный поток излучения от нижнего источника и рассеянное излучение верхнего источника, отраженного от куска руды. В зависимости от величины им-

пульса, поступающего от детектора в радиометр и зависящего от вещественного состава и размера куска, исполнительный механизм направляет кусок в тот или иной продукт.

Другой вариант двухлучевого устройства (см. рис. 2.2, в) [21] основан на использовании различия в ослаблении γ -излучения малой и средней энергий кусками углей с разной зольностью. Сущность этого метода описана выше.

Сепарация углей и руд черных и цветных металлов

Сепарация углей основана на резком различии вещественных составов и характеристик углей (антрацита, каменных и бурых) и пород (песчаников, глин, известняков). Плотность углей находится в пределах от 1,1 до 1,65 г/см³, плотность пород обычно 1,8—3,0 г/см³. Эффективные атомные номера углей и пород равны соответственно 6,0—7,2 и 11,6—15,1, а средние линейные

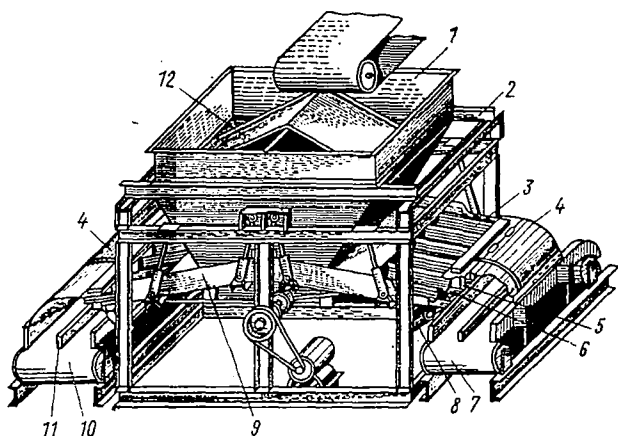


Рис. 2.3. Схема сепаратора РС-24.

коэффициенты ослабления γ -излучения (энергия 50 кэв) изменяются в пределах 0,2—0,3 см⁻¹ и 0,60—1,40 см⁻¹ [72, 74]. Поэтому наиболее ранние работы по оценке возможностей γ -абсорбционного метода проводились в первую очередь применительно к обогащению углей [19—23, 65, 66]. Разработаны основные вопросы теории, а также аппаратура, в том числе сепаратор типа РС-24 [29, 64] и сепаратор с компенсатором неравномерности кусков [23].

Сепаратор РС-24 предназначен для породотборки на угольных шахтах (рис. 2.3). Крупность обогащаемого угля — 100+ +50 мм. Сепаратор имеет 24 канала, общая производительность которых 30 т/ч. Масса сепаратора 3,8 т. Уголь поступает в

приемный бункер 1, где с помощью желобов 12 разделяется на два потока. Каждый из потоков поступает на свой вибрационный питатель 9 (левый и правый), который распределяет поток по вибрирующим желобкам (каналам) 3, оканчивающимся гребенками 6. Источники излучения (рентгеновские трубки 2БСМ-75) и сцинтилляционный детектор излучения 5 располагаются между гребенками отдельных каналов. В момент прохождения по гребенке куска породы поток излучения, регистрируемый детектором, уменьшается и радиометр дает сигнал на срабатывание электромеханического сбрасывателя 8, находя-

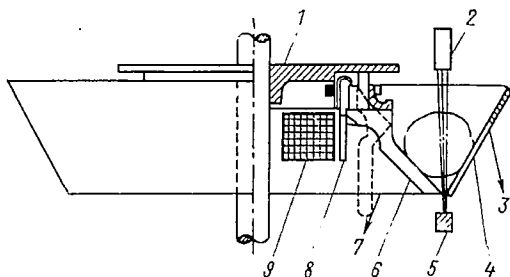


Рис. 2.4. Секция сортировочной установки:

1 — кольцо транспортера; 2 — детектор; 3 — разгрузка угля; 4 — опорный конус; 5 — излучатель; 6 — палец; 7 — разгрузка породы; 8 — собачка; 9 — электромагнит.

щегося под гребенкой. Он направляет кусок породы на хвостовое отделение транспортера 10 (7). При прохождении по гребенке кусков угля радиометр не срабатывает, и они попадают в отделение концентрата транспортера 10 (7), разделенного перегородкой 11 на две секции. Защита обслуживающего персонала от действия рассеянного излучения обеспечивается специальным кожухом 4.

Другая конструкция сепаратора описана в работе [23]. Основной рабочий узел сепаратора — кольцевой конвейер специальной конструкции (рис. 2.4). Он позволяет разгружать избирательно куски породы и угля. Конвейер проходит несколько секций, расположенных по окружности на одном диске.

Каждая секция представляет собой комбинацию облучательно-измерительного и разделительного узлов. Разгрузка любой секции осуществляется в процессе движения; уголь удаляется через окно опорного конуса, а порода — в специальную течку через пальцы конвейера, отбрасываемые электромагнитом при получении сигнала от радиометра. При дальнейшем перемещении пальцы конвейера проходят над наклонно установленной полосой и, скользя по ней, возвращаются в исходное положение.

Производительность одного шестисекционного сепаратора примерно 25 т/ч. Источник γ -излучения — Tm^{170} эквивалентен 4 мг-экв Ra. Сепаратор оснащен сцинтилляционным детектором (кристалл NaI + ФЭУ-31) и компенсирующими устройствами.

γ -Абсорбционный метод сепарации углей разрабатывается также в Великобритании [83, 96]. На одной из шахт уголь от породы отсортировывают на электропневматическом сепараторе, питание которого осуществляют с вибрационного грохота и системы конвейеров. Соотношение скоростей движения транс-

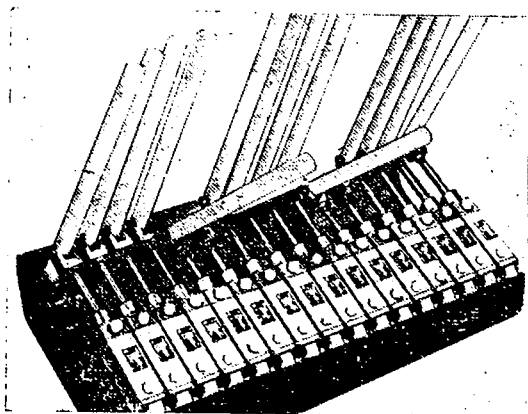


Рис. 2.5. Блок пневмоцилиндров с нейлоновыми пальцами.

портеров подобрано так, чтобы обеспечивалась удовлетворительная степень рассредоточения кусков на конечном транспортере, лента которого имеет скорость 0,51 м/сек. Материал, падающий с транспортера, пересекает плоскость, в которой распространяются γ -кванты, испускаемые батареей γ -источников. Различие в потоках излучения, прошедших через кусок угля или породы, регистрируется чувствительным детектором. В дальнейшем куски пересекают шеренгу (общая длина 560 мм), состоящую из 16 негнущихся нейлоновых пальцев, длина каждого из которых 355,6 мм, а диаметр 34,9 мм. Пальцы приводятся в движение пневматическими цилиндрами Махат (рис. 2.5), время срабатывания которых составляет $\frac{1}{12}$ сек. По сигналу с радиометра один или более пальцев могут одновременно отклоняться, позволяя куску породы падать прямо в бункер. При прохождении кусков угля чувствительная система сепаратора не приводится в действие и они направляются на соответствующий конвейер. На установке перерабатывают класс — 152 + 76 мм. Отношение проникающей способности для γ -квантов, проходящих через уголь и породу, составляет примерно 4 : 1. Это дает возможность обеспечивать эффективную сепарацию при условии,

что колебания в размерах сортируемых кусков не превышают указанного соотношения. Чувствительность сепаратора может изменяться в широких пределах. В то же время отмечается, что эффективность сепарации не стопроцентная, так как малая часть породы остается с углем, а часть угля попадает в породу. Авторы работы [83] считают, что часть породы, которая осталась с углем, может быть в дальнейшем довыбрана вручную.

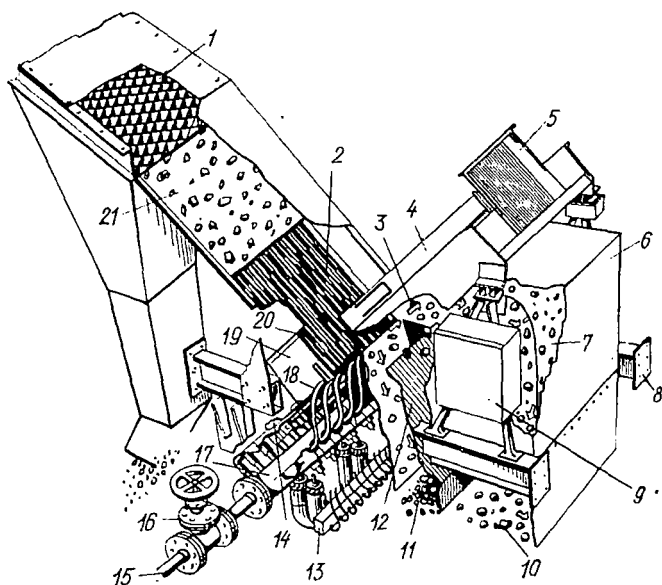


Рис. 2.6. Схема сепаратора для обогащения углей:

1 — малогабаритный неподвижный грохот; 2 — решетка с направляющими желобами; 3 — путь отбрасываемого продукта; 4 — коллиматор; 5 — источник излучения; 6 — кожух над точкой; 7 — обивка кожуха; 8 — рама; 9 — блок контроля; 10 — отбрасываемый продукт; 11 — очищенный продукт; 12 — разделяющая пластина; 13 — управляющее устройство; 14 — пневмоклапаны; 15 — приток воздуха; 16 — вентиль; 17 — трубопровод; 18 — сопла пневмоклапанов; 19 — фотоумножители; 20 — детекторы излучения; 21 — лоток.

Опытный образец другого сепаратора [84] (рис. 2.6) предназначен для обогащения углей крупностью $—63,5+31,7$ мм с производительностью 20 т/ч. Отмечается, что достигнутая эффективность сепарации удовлетворяет коммерческим требованиям рынка сбыта.

Сепарация руд черных металлов. Первые исследования по оценке возможностей сепарации железных руд γ -абсорбционным методом проведены в 1962 г. на сепараторе РС-12 [11, 12]. В процессе этих работ исследованы рациональные параметры источников излучения, пути повышения эффективности и область применения метода. При опытной сортировке руд Криворожского и Белозерского месторождений были выделены мартеновские руды с содержанием 65,1—68,2% железа. Содержание

железа в хвостах сортировки составляло 12,0—27,5%. В этих работах была доказана принципиальная возможность обогащения железных руд γ -абсорбционным методом и сделан первый шаг в решении большой проблемы.

На основе последующих исследований был создан сепаратор РС-2Ж, предназначенный для обогащения железных руд крупностью —200+100 мм [42].

Принцип работы этого сепаратора (рис. 2.7) заключается в следующем. Руда из бункера I поступает на вибропитатель 2,

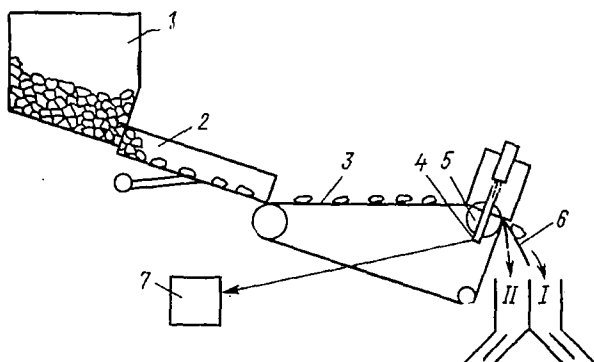


Рис. 2.7. Схема сепаратора РС-2Ж.

поштучно направляющий сортируемые куски по двум каналам на ленточный конвейер 3. Покусковая подача руды становится возможной в результате изменения скорости перемещения кусков с 0,2—0,3 м/сек (на вибропитателе) до 0,4—0,6 м/сек (на ленточном транспортере). Куски, пройдя через облучательно-измерительный узел сепаратора, поступают в узел разделения, где с помощью шибера 6 делятся на концентрат и хвосты. Облучательно-измерительный узел сепаратора состоит из источника γ -излучения и радиометра 7, оснащенного сцинтилляционными детекторами излучения 4. Последние располагаются в головке барабана 5. В отсутствие куска руды детектор 4 регистрирует максимальный поток γ -излучения. Если пучок излучения перекрывается куском руды, то уровень излучения уменьшается в зависимости от содержания железа. Если он оказывается меньше заданного порога срабатывания радиометра, то последним выдается сигнал, управляющий шиберным устройством. В результате шибер из положения I перемещается в положение II и кусок руды свободно падает в течку для концентрата. Если уровень излучения оказывается выше порога срабатывания, то шибер, оставаясь в положении I, направляет кусок в хвосты.

Сепаратор РС-2Ж работает в комплекте с радиометром «Днепр-4», разработанным в шестиканальном варианте. Один

радиометр работает с двумя сепараторами РС-2Ж. Производительность сепаратора на классе —200+100 мм составляет 20—25 т/ч. Источником γ -квантов служит изотоп Cd^{109} активностью 10 мкюри. Габариты сепаратора 1235×1180×2350 мм, общая масса 895 кг. Разработанная аппаратура в 1967 г. прошла испытания на шахте «Гигант-Глубокая» Криворожского бассейна [44]. Сортировке подвергались рядовые руды крупностью —250+100 мм со средним содержанием железа 52,05%. В результате обогащения (табл. 2.2) получен мартеновский

Таблица 2.2

Технологические показатели обогащения железной руды
на опытной установке, %

Продукты обогащения	Выход	Содержание			Извлечение железа
		железа	нерастворимого остатка	кремнезема	
Концентрат	75,4	60,1	9,8	7,4	86,9
Хвосты	24,6	27,8	54,5	47,0	13,1
Исходная руда	100,0	52,05	20,8	17,1	100,0

концентрат с содержанием 60,1% Fe и 7,4% SiO_2 . Производительность сепаратора в пределах от 10 до 30 т/ч. Отмечается, что внедрение сепараторов РС-2Ж позволит заменить малопродуктивную ручную породовыборку во всем Криворожском бассейне. В перспективе намечается организация сортировки руд крупностью более 30 мм.

γ -Абсорбционный метод находит применение и для обогащения хромовых руд [45, 46]. Исследованию подвергали руды Южно-Кемпирсайского и Донского месторождений. Результаты исследований в 1970 г. были подтверждены промышленными испытаниями, которые проводились с использованием сепаратора РС-2Ж на дробильно-сортировочной фабрике Донского хромитового рудоуправления. В процессе испытаний из хромовой руды (класс +100 мм) с содержанием 49,6% окиси хрома получены концентрат и хвосты с содержанием окиси соответственно 55,7 и 18,25% [46].

Сепарация руд цветных металлов. γ -Абсорбционный элементный метод сепарации может быть применен и для обогащения различных руд цветных металлов. В частности, уже проводится разработка этого метода в применении к сурьмяным, ртутным и свинцовым рудам [4—7, 53, 78].

Сепарация ртутных и сурьмяных руд [6, 79] основана на резком различии массовых коэффициентов ослабления γ -излучения киноварью (HgS), антимонитом (Sb_2S_3) и кварцем (SiO_2), из которого в основном состоят вмещающие породы (табл. 2.3).

Массовые коэффициенты ослабления γ -излучения некоторыми минералами, $см^{-1}$ [4]

Энергия γ -квантов, кэв	Киноварь	Антимонит	Кварц	Энергия γ -квантов, кэв	Киноварь	Антимонит	Кварц
30	19,342	21,695	0,837	100	4,508	1,302	0,167
50	4,982	8,100	0,305	150	1,587	0,498	0,141
80	4,413	2,324	0,193	300	0,324	0,150	0,107
				500	0,137	0,087	0,087

Опыты, проведенные на лабораторной установке, оснащенной источником Tm^{170} , показали, что γ -абсорбционным методом можно обогащать ртутные и сурьмяные руды. В отсутствие учета толщины кусков возможна сортировка руд крупностью $-75+20$ мм для выделения кусков, содержащих не менее 5% ртути или 20% сурьмы.

Возможность применения этого метода изучали и для комплексных ртутно-сурьмяных руд [4]. Опыты проводили на лабораторной модели сепаратора с источником Tm^{170} , эквивалентным 0,86 мг-экв Ra. Излучение регистрировали сцинтилляционным счетчиком [кристалл $NaI(Tl)$, 20×10 мм + ФЭУ-31]. Изучаемые образцы (190 шт.) ртутно-сурьмяной руды различались по форме и размерам. Распределение киновари и антимонита среди вмещающих пород, в основном представленные карбонатами и кварцем, крайне неравномерное. Плотность образцов колебалась в пределах 2,48—5,11 г/см³, а толщина — от 5 до 140 мм. Исследованиями установили, что сепарации могут подвергаться руды крупностью $-75+25$ мм для выделения кусков с плотностью выше 3,0 г/см³. При такой плотности в образцах содержится 1,5—2,0% Hg и 5—7% Sb. При уменьшении содержания ценных компонентов соответственно сужается диапазон крупности кусков, в котором возможна выборка штучного концентрата.

Подобные исследования провели и на свинцовых рудах [5]. Содержание свинца в исследованных образцах (класс $-90+20$ мм) было в пределах от 0,3 до 10—15%, плотность изменялась от 2,60 до 4,92 г/см³, а толщина кусков от 15 до 155 мм. Анализ приведенных в этой работе фактических материалов показывает, что при сепарации класса $-90+20$ мм свинцовых руд в концентрат будут направляться все куски с содержанием Pb выше 3%, а в хвосты — все куски с содержанием Pb менее 0,8%. Куски с содержанием свинца от 0,8 до 3,0% будут делиться между хвостами и концентратом в зависимости от содержания свинца, их толщины и некоторых других факторов. Применение системы учета толщины кусков позволит повысить

разрешающую способность сепаратора или расширить диапазон сортируемых классов.

В последующих работах сообщается [53], что испытания в лабораторных условиях макета сепаратора с компенсационным устройством при сортировке ртутно-сурьмяных и сурьмяных руд подтвердили описанные выше выводы.

2. МЕТОДЫ СЕПАРАЦИИ, ОСНОВАННЫЕ НА РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННОГО И ДРУГИХ ИЗЛУЧЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЕРВИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С АТОМАМИ ВЕЩЕСТВА

Методы данной группы до последнего времени развивались слабо, несмотря на то что первые работы по одному из методов этой группы (сепарация угля от породы по рассеянному γ -излучению) проведены в начале 50-х годов [85]. В 1966—1968 гг. появились сообщения о разработке β -рентгеновского метода и соответствующей аппаратуры для сепарации руд различных металлов [88, 90], а в 1968—1970 гг. — о разработке метода сепарации железных руд и щебня на основе использования рассеянного γ - или рентгеновского излучения [49, 55, 62а].

β -Рентгеновский метод

Этот метод — один из так называемых рентгенорадиометрических методов, основанных на использовании способности атомов возбуждаться под действием различных видов излучений и испускать характеристическое излучение при переходе в нормальное состояние.

Как известно, характеристическое излучение может возбуждаться под действием α - и β -частиц, γ -квантов и различных видов рентгеновского излучения (тормозного и характеристического). Соответственно этому могут быть выделены α -, β -, γ - и рентгено-рентгеновские методы сепарации руд. Часто эти методы называют рентгенорадиометрическими [72, 73, 80]. По существу эта группа включает в себя как атомнофизические методы (рентгено-рентгеновский), так и ядернофизические (α -, β - и γ -рентгеновские методы). Общее у всех этих методов — возбуждение и регистрация характеристического излучения отдельных химических элементов и проведение на этой основе сортировки руд, содержащих элементы со средними и большими порядковыми номерами.

Оценку возможностей в области применения этих методов можно дать на примере β -рентгеновского метода [88]. Метод основан на использовании различия в потоках характеристического излучения, испускаемых рудными кусками в момент их облучения β -частицами. В результате взаимодействия частиц

с веществом возникают рассеянные β -частицы, тормозное излучение, а также характеристическое излучение.

В описанном методе используется зависимость характеристического излучения K -уровня атомов от их порядкового номера. Вероятность возбуждения K -уровня определяется сложной функцией в зависимости от энергии электрона и энергии возбуждения K -уровня для выбранного элемента [72, 80]. Энергия данного уровня возрастает с увеличением порядкового номера элемента. Подробное изложение физических основ описываемого метода можно найти в работе [80].

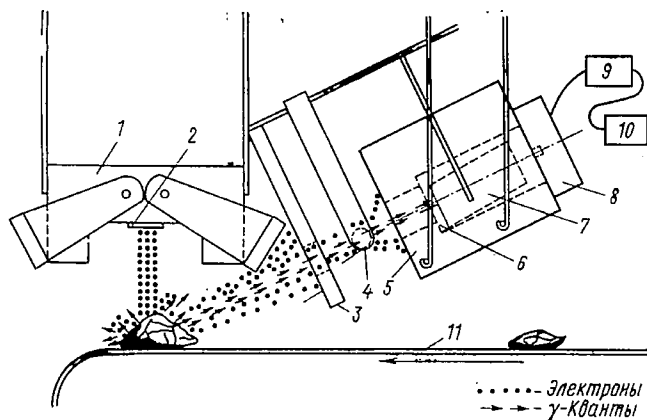


Рис. 2.8. Схема установки (для иллюстрации контейнер развернут на 90°):

1 — контейнер; 2 — источник излучения; 3 — коллиматор; 4 — магнит; 5 — свинцовый коллиматор; 6 — кристалл NaI(Tl); 7 — ФЭУ; 8 — предусилитель; 9 — усилитель и анализатор; 10 — пульт радиометра; 11 — ленточный конвейер.

Принципиальная схема установки для сепарации различных руд β -рентгеновским методом показана на рис. 2.8 [88]. В качестве источника использован изотоп Sr^{90} (период полураспада 28,4 года, максимальные энергии β -частиц, испускаемых источником, 0,54 и 2,25 Мэв). Активность источника по изотопу Sr^{90} составляет 200 мкюри ($7,4 \cdot 10^9$ расп/сек). Источник укрепляется в свинцовом контейнере, автоматически закрывающемся при неисправностях в работе установки, а также в тот момент, когда она находится в нерабочем состоянии. Уровень излучения с поверхности закрытого контейнера составляет $1/100$ часть безопасной дозы. Часть рассеянных электронов и γ -квантов тормозного и характеристического излучений, возникающих при взаимодействии β -частиц с веществом кусков руды, проходит через коллиматор. Далее на пути частиц и γ -квантов установлен постоянный магнит, который изменяет траекторию заряженных частиц, в результате чего на сцинтилляционный детектор

поступают только тормозное и характеристическое излучения. Выделение характеристического излучения на фоне тормозного осуществляется с помощью одноканального амплитудного анализатора. Если число импульсов, накопившихся в счетном канале и соответствующих определенному энергетическому интервалу, превышает порог срабатывания прибора, то кусок направляется в концентрат. Если характеристическое излучение требуемого элемента прибором не обнаружено, то кусок направляется на перечисленные операции для исследования других сторон его поверхности. Если за три цикла облучения и регистрации излучение требуемого элемента не обнаруживается, то кусок направляется в хвосты.

Сепаратор предназначен для переработки руд крупностью от 50 до 250 мм. Продолжительность регистрации составляет не менее 0,1 сек. Чтобы сортировка руд была эффективной, рудный материал должен обладать определенными свойствами. Важно, чтобы куски руды характеризовались сильной поверхностной минерализацией полезного минерала, так как проникающая способность характеристического излучения в породе составляет всего несколько миллиметров. Эффективность сепарации руд тем выше, чем больше среднее содержание полезного компонента.

На сепараторе перерабатывались руды, содержащие мышьяк, селен, молибден, ниобий, цезий, вольфрам и свинец. Установлено, что чем больше порядковый номер полезного элемента, тем легче детектировать его излучение. Руды, содержащие полезные элементы с порядковым номером меньше 36, трудно обогащаются на описываемом сепараторе, так как характеристическое излучение таких элементов сильно поглощается воздушным слоем между детектором и рудным образцом.

Сепарация полезных ископаемых по регистрации рассеянного излучения

Метод сепарации железных руд (по работе [49]) основан на регистрации рассеянного γ -излучения изотопа Tm^{170} ($E_{\gamma} = 84$ кэв) или тормозного излучения с энергией меньше 100 кэв. При облучении руды ослабление потока γ -излучения ($E_{\gamma} = 60 \div 100$ кэв) происходит в результате двух процессов: упругого (томпсоновского) рассеяния и фотопоглощения. С увеличением в руде содержания железа увеличивается вклад фотоэффекта и соответственно уменьшается выход рассеянных γ -квантов. И наоборот, при увеличении содержания в кусках руды породообразующих элементов (Si, Al и др.) существенно возрастает вклад упругого рассеяния с соответствующим увеличением выхода рассеянных γ -квантов. Помимо изложенного, плотность потока рассеянного γ -излучения, отраженного от

кусков руды, зависит также от энергии первичного излучения и геометрических условий облучения и регистрации.

Принципиальная схема облучательно-измерительного узла сепаратора приведена на рис. 2.9. Так как проникающая способность мягкого γ -излучения в рудах незначительна (10—20 мм), то заметное влияние на результаты сепарации может оказать слоистость отдельных кусков руды. Для уменьшения степени влияния этого эффекта предполагается установить на V-образном лотке, по которому перемещаются куски, два детектора отраженного γ -излучения (под углом 90° друг к другу). Разделяющий механизм сепаратора в этом случае срабатывает только после получения сигналов от последовательно включенных исполнительных реле обоих каналов. Сепаратор позволяет производить сепарацию железных руд крупностью от 200 до 40 мм для выделения пустой породы и мартеновской руды. Производительность установки по предварительным расчетам равна 15—20 т/ч.

Сепарация карбонатного щебня [55, 62а]. В результате исследований установлена принципиальная возможность обогащения щебня путем удаления комовой глины на основе регистрации: а) проникающего γ -или рентгеновского излучения (γ -абсорбционный метод); б) рассеянного (отраженного) излучения и в) проникающего и рассеянного излучений одновременно.

Авторы этих работ пришли к выводу, что сортировку щебня наиболее целесообразно производить на основе регистрации различий в интенсивности рассеянного излучения. Наибольшую степень различия наблюдают при энергии первичного излучения до 100 кэв. В этих условиях принципиально возможна сепарация довольно широких классов крупности, например —250+50 мм.

Определенное отрицательное влияние на результаты сортировки могут оказать примазки глины на поверхности кусков известняка. Их средняя толщина в продуктах первичного дробления в весенний период работы двух обследованных фабрик составила всего 1,5—1,9 мм. Исследованиями установили, что наличие таких примазок не является препятствием для реализации рассматриваемого метода. Проведенные работы послужили основанием для разработки сепаратора, способного сортировать карбонатный щебень крупностью —250+50 мм.

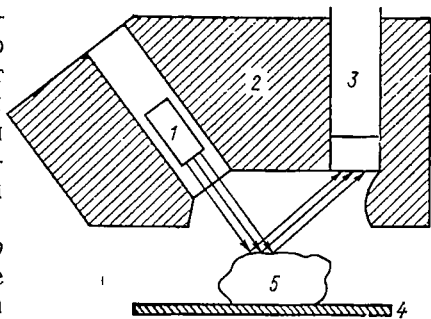


Рис. 2.9. Схема облучательно-измерительного узла сепаратора для сортировки руд по регистрации рассеянного излучения:

1 — источник γ -излучения; 2 — экран; 3 — детектор рассеянного излучения; 4 — конвейер; 5 — кусок руды.

3. МЕТОДЫ СЕПАРАЦИИ, ОСНОВАННЫЕ НА РЕГИСТРАЦИИ МГНОВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ Физические основы γ -нейтронного метода

γ -Нейтронный (фотонейтронный) метод обогащения полезных ископаемых основан на регистрации различий в интенсивности нейтронного излучения кусков руды, возникающего при их облучении γ -квантами определенной энергии. В основу метода положено использование ядерной реакции (γ, n), заключающейся в том, что при бомбардировке ядер различных изотопов γ -квантами определенной энергии ядра могут испускать нейтроны, называемые (в данном случае по способу получения) фотонейтронами.

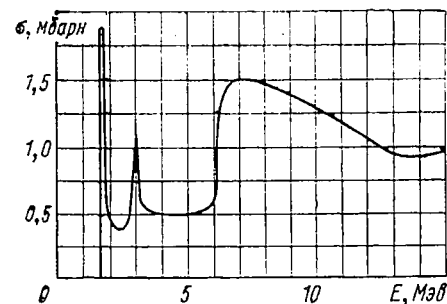


Рис. 2.10. Сечение реакции (γ, n) на бериллии в зависимости от энергии γ -квантов.

Каждый элемент имеет определенный порог реакции (γ, n). Наименьшие пороги рассматриваемых реакций наблюдаются у бериллия (1,665 Мэв) и дейтерия (2,23 Мэв). Большинство остальных элементов имеет порог реакции от 6 до 20 Мэв. Характеристики некоторых изотопов, имеющих малый порог реакции (γ, n), сведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Изотопы с малым порогом реакции (γ, n)

Изотоп	Распространенность, %	Порог реакции, Мэв	Изотоп	Распространенность, %	Порог реакции, Мэв
Be ⁹	100	1,665	Sn ¹¹⁹	8,58	6,55
H ²	0,015	2,225	Pb ²⁰⁷	22,6	6,88
O ¹⁷	0,037	4,14	Mo ⁹⁷	9,45	7,1
C ¹³	1,11	4,95	Li ⁷	92,47	7,15
Li ⁶	7,52	5,35	Zr ⁹¹	11,23	7,2
U ²³⁸	99,28	5,97	Mg ²⁵	10,11	7,25
Pt ¹⁹⁶	33,7	6,10	Pb ²⁰⁸	52,3	7,40
Hg ²⁰¹	13,22	6,25	Tl ²⁰⁵	70,5	7,5
Th ²³²	100,0	6,35	Ta ¹⁸¹	100	7,6
Cd ¹¹³	12,26	6,50	Fe ⁵⁷	2,17	7,75

Своеобразна зависимость сечения реакции (γ, n) от энергии γ -квантов (рис. 2.10). Обычно за пороговым значением энергии сечение реакции резко возрастает (область гигантского резонанса), а затем падает. В дальнейшем с ростом энергии γ -кван-

тов сечение медленно растет. На фоне этого роста наблюдаются малые резонансы [51].

Энергия фотонейтронов E_n зависит от энергии γ -квантов [72]:

$$E_n = \frac{A-1}{A} \left[E_\gamma - E_\tau - \frac{E_\gamma}{1862(A-1)} \right] + \delta, \quad (2.11)$$

где E_τ — порог реакции (γ, n), *Мэв*; δ — коэффициент, учитывающий разброс нуклонов в зависимости от угла их вылета.

При постоянной энергии γ -квантов выход фотонейтронов резко увеличивается с ростом порядкового номера облучаемого элемента. Это во многом определяется тем обстоятельством, что пиковое сечение реакции (γ, n) увеличивается с ростом атомной массы элементов приблизительно пропорционально $A^{5/3}$ и достигает на тяжелых элементах примерно 1 *барн* [18].

Для осуществления фотоядерных реакций на бериллии могут быть использованы γ -кванты некоторых радиоактивных изотопов, энергия которых превышает порог соответствующей реакции. Нейтроны, получаемые при этом, моноэнергетические. Для осуществления реакции (γ, n) на других изотопах обычно используют тормозное излучение ускорителей электронов, которое не является однородным по энергии. Соответственно спектр возникающих нейтронов не моноэнергетический.

Среди изотопных источников наиболее удобен изотоп Sb^{124} (см. табл. П.5), испускающий достаточно сильное γ -излучение с энергией, превышающей порог реакции (γ, n) на бериллии. Для γ -квантов Sb^{124} сечение этой реакции равно 1,3 *мбарн*, что обеспечивает довольно высокий выход фотонейтронов, равный $1,9 \cdot 10^5$ *нейтрон/(кюри·сек·г)*. Недостаток этих источников γ -излучения — относительно малый период полураспада (60,9 дня). Большим периодом полураспада (1620 лет) обладает Ra^{226} в равновесии с продуктами распада. Однако у этого источника имеется относительно высокий собственный нейтронный фон [86], что не позволяет использовать его при фотонейтронной сепарации руд.

Характеристика ускорителей электронов дана в табл. П.7.

При использовании изотопных источников γ -излучения наиболее эффективные детекторы нейтронов — газоразрядные счетчики с гелиевым наполнением (СНМ-16, СНМ-17 и др.), а также сцинтилляционные счетчики на основе светосостава Т-2 и др. [67].

Анализ физических основ метода показывает, что чувствительность метода определяется многими факторами, среди которых основные: 1) тип применяемого источника излучения, его мощность, энергия и сечение реакции (γ, n) на бериллии при выбранной энергии γ -излучения; 2) геометрические условия облучения и регистрации фотонейтронов (размеры и форма источника, кусков руды и детекторов нейтронов и их взаимное расположение в облучательно-измерительном узле сепаратора);

3) вещественный состав кусков руды, в том числе присутствие в них элементов, сильно поглощающих нейтроны; 4) масса кусков руды, скорость их перемещения через облучательно-измерительный узел сепаратора и др.

Сепарация руд

Результаты лабораторных опытов по сортировке искусственных смесей берилла и кварца описаны в работе [86]. В исследованиях использовали радиевый источник нейтронов (1 г экв Ra) и генератор Ван де Граафа с энергией γ -излучения 2,0—2,1 Мэв и током 100—200 мка. Фотонейтроны регистрировались счетчиками, наполненными фтористым бором, обогащенным В¹⁰. Некоторые условия проведения этих работ охарактеризованы в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Статическая чувствительность аппаратуры при использовании источника (1 г Ra) и генератора Ван-де-Граафа ($E_\gamma = 2,1$ Мэв, $I = 110$ мка)

Тип источника	Масса образцов, состоящих из берилла, г	Q_c , имп/(сек × Xг)	Тип источника	Масса образцов, состоящих из берилла, г	Q_c , имп/(сек × Xг)
Генератор Ван-де-Граафа	3—65	50—60	Генератор Ван-де-Граафа	200	37—42
			Радиевый	600	8—10

Примечание. При расчете параметра Q_c принято, что содержание бериллия в берилле составляет 4%.

Сортировку искусственной смеси берилла и кварца проводили на установке, схема которой приведена на рис. 2.11. Подача рудного материала 10 на транспортную ленту 7 осуществляется с помощью вибрационного питателя. Лента шириной 76 мм проходит со скоростью 15—27 см/сек через полукруглый туннель 5 в парафиновом блоке 9. В последнем расположено 4 счетчика нейтронов 4 с предварительными усилителями импульсов 8, соединенных коаксиальными кабелями с электронной схемой. В верхней части блока и в коллиматоре 3 сделано отверстие для пучка излучения 2 от антикатада генератора Ван-де-Граафа 1, облучающего куски берилла. В зоне облучения над лентой расположен электромагнитный сбрасыватель 11, приводящийся в действие электронной схемой и направляющий рудные куски в течку 6. Максимальная частота срабатывания сбрасывателя 5 гц. Порог срабатывания схемы составлял 1—2 импульса за время регистрации, изменяемое в

пределах от $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{5}$ сек. Установка обеспечивает отбор в концентрат образцов берилла массой 10 и 15 г с вероятностью 100%, с массой 5 г — 96%, 3 г — 77% и однограммового куса берилла — с вероятностью 33%. Данные получены при расстоянии между антикатодом и кусками 90 см и токе генератора 100 мка.

При сортировке искусственной смеси кусков берилла и кварца (класс —19+13 мм) эффективность извлечения кусков

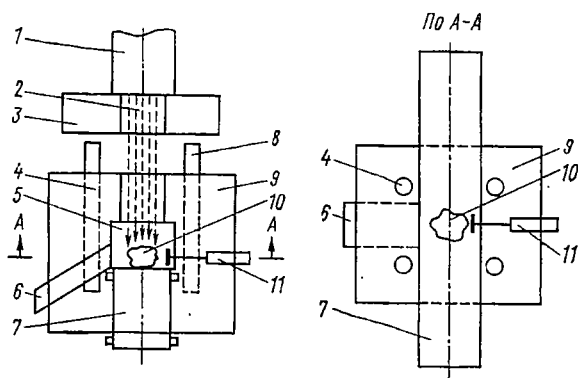


Рис. 2.11. Схема сортировочной установки.

берилла изменялась в зависимости от различных условий от 47 до 90%. Концентрат при этом был сильно загрязнен кварцем (отношение кусков берилла к кускам кварца в концентрате изменялось от 1:1 до 1:10), так как авторы не решили проблему равномерной подачи рудного материала вибрационным питателем.

Обширные исследования, связанные с разработкой вопросов практического использования и технологии обогащения бериллиевых руд фотонейтронным методом с применением в качестве источника γ -излучения изотопа Sb^{124} , проведены в Советском Союзе. В результате создан комплекс аппаратуры и оборудования, позволяющий осуществлять первичную сортировку руд в емкостях (ящиках, вагонетках, автомашинах), обогащение бериллиевых руд на фотонейтронных сепараторах, а также выполнять экспресс-анализ руд и продуктов их обогащения и экспресс-анализ отдельных кусков руды для определения ее контрастности. В промышленном масштабе фотонейтронная сепарация этих руд применяется с 1966 г. [34, 68].

Исследованиями установлено, что многие бериллиевые руды обладают достаточно высокой степенью контрастности. Показатель контрастности M по отдельным типам руд изменяется в пределах от 0,9 до 1,6. При этом наиболее контрастные — берилловые и гентгельвиновые руды. Возможности фотоней-

тронной сепарации различных по вещественному составу бериллиевых руд наглядно характеризуются данными, приведенными в табл. 2.6. Они показывают, что теоретический выход хвостов оказывается значительным, и по отдельным типам достигает 70—90% сортируемых классов.

Для сортировки руд применяют установки РКС-2Б (для первичного обогащения горнорудной массы, находящейся в вагонетках) и фотонейтронные сепараторы вибрационного (РМБ-300 и РМБ-100) и ленточного (РМБЛ-100) типа. Активность источников γ -излучения изотопа Sb^{124} , применяемых в сепараторах, достигает 2 *кюри*. Параметры сортировочной аппаратуры приведены в табл. 2.7 [34]. Фотонейтронные сепараторы оснащены радиометрами РСБ-2 и УСБ-3 со сцинтилляционными детекторами Т-2. Получают распространение гелиевые счетчики типа СНМ-17 и др. Порог чувствительности сепараторов для сортировки классов —200+75 мм и —75+25 мм составляет соответственно 0,02—0,05% и 0,04—0,2%.

Принципиальная схема фотонейтронной сепарации включает дробление кусков крупнее 200 (—300) мм, грохочение, а также промывку, облучение и сортировку машинных классов. Аппаратура, используемая при переработке руд по этой схеме в зависимости от гранулометрического состава, контрастности, содержания полезного компонента в сортируемых классах, вещественного состава и т. п., обеспечивает получение выхода хвостов в пределах от 25 до 40% от исходной руды или 50—80% сортируемых классов.

Область применения фотонейтронного метода сепарации полезных ископаемых, основанного на использовании изотопных источников γ -излучения, пока ограничивается только бериллий-содержащими рудами. Использование ускорителей электронов для облучения различных руд создает возможности для резкого расширения областей применения фотонейтронного метода обогащения сырья, в первую очередь за счет использования высокоэнергетического излучения (до 10—15 Мэв) сильноточных ускорителей электронов со средним током на мишени до 100—500 мка (см. табл. П.7). Однако при этом возникают определенные трудности, в частности проблема селективности фотонейтронного метода сепарации руд, так как с ростом энергии γ -излучения все большее число изотопов может вступать в реакцию (γ, n). Так, при энергии γ -излучения до 5 Мэв реакция (γ, n) идет на изотопах Be^9 , H^2 , O^{17} и C^{13} . При повышении энергии до 7 Мэв в реакцию (γ, n) дополнительно вступают изотопы Li^6 , U^{238} , Zn^{67} , Cd^{113} , Sn^{119} , Pt^{195} , Hg^{201} , Pb^{207} , Th^{232} и др. При энергии тормозного излучения 18—20 Мэв рассматриваемая реакция идет на всех изотопах. Таким образом, максимальная энергия тормозного излучения ускорителей электронов определяет количество изотопов, вступающих в реакцию (γ, n), и спектр возникающих фотонейтронов.

Характеристика контрастности класса —200 +25 мм некоторых типов руд, %

Фракция	Берилловые руды			Гентгельвиновые руды			Бертраундит-фенакитовые руды			Фенакитовые руды		
	Выход	Со-дер-жа-ние ВеО	Из-ве-ще-ние	Выход	Со-дер-жа-ние ВеО	Из-ве-ще-ние	Выход	Со-дер-жа-ние ВеО	Из-ве-ще-ние	Выход	Со-дер-жа-ние ВеО	Из-ве-ще-ние
1	59,16	0,003	1,9	74,0	0,005	1,52	39,35	0,009	0,42	42,8	0,005	3,1
2	22,06	0,018	4,1	8,2	0,013	0,44	14,63	0,013	0,22	25,0	0,020	7,3
3	5,89	0,040	2,5	1,6	0,027	0,18	5,93	0,036	0,25	9,2	0,040	5,3
4	4,32	0,068	3,0	1,0	0,115	0,47	6,63	0,064	0,43	9,5	0,069	9,5
5	3,67	0,197	7,4	3,2	0,269	3,52	8,04	0,299	2,87	11,3	0,218	35,8
6	1,75	0,392	7,1	1,6	0,539	3,55	3,39	0,516	2,09	1,1	0,682	10,9
7	1,37	0,697	9,7	3,8	0,947	14,81	5,37	1,173	6,52	1,1	1,760	28,1
8	1,37	2,374	33,2	6,6	2,780	75,49	13,90	3,313	55,0	—	—	—
9	0,41	7,150	31,2	—	—	—	3,76	6,940	31,20	—	—	—
Итого	100,0	0,096	100,0	100,0	0,243	100,0	100,0	0,837	100,0	100,0	0,069	100,0

Сортировочная аппаратура и ее параметры

Тип аппаратуры	Класс крупности сортируемой руды, мм	Кол-чество ручье-ев	Питающее устройство	Детектор нейтронов	Разделяющее устройство	Производительность на 1 ручья, т/ч	Экспозиция, сек	Чувствительность, $\mu\text{мл}/(\text{сек}\cdot\text{г})$ 1-2-я кв Ра
РКС-25	—400	—	—	СНМ-11 или СНМ-18	—	Более 100	До 60	30 000 $\mu\text{мл}/(\text{млн}\cdot\%)$
РМБ-300	—200+75	1	Вибропитатель Виброконвейер	Синтиглия-ционный \varnothing 170 мм	Шибер с элект-ропневмоприводом	10—15	0,2—0,5	25—40
РМБ-100	—75+25	1	Вибропитатель	То же	Шибер с элект-ромагнитным приводом	1—3	0,2—0,5	70—150
РМБЛ-100	—75+25	2	Вибропитатель Ленточный конвейер	Синтиглия-ционный или гелиевые счетчики СНМ-17	То же	1—3	0,1—0,4	100—200

Более детальный анализ условий облучения показывает, что, несмотря на отмеченные трудности, в ряде случаев (по крайней мере при энергиях тормозного излучения до 8—12 Мэв) может быть обеспечено селективное выделение фотонейтронов, испускаемых интересующими нас изотопами, а следовательно, и эффективная сепарация руд, содержащих такие изотопы. Этот вывод основан на учете ряда обстоятельств. Если расположить изотопы в порядке возрастания величины порогов реакции (γ , n), то выявляется, что все изотопы можно разделить на две основные группы. В первую группу (порог реакции ниже 11—13 Мэв) входят основные изотопы химических элементов, относящихся к цветным и редким металлам; во вторую (порог реакции выше 11—13 Мэв) — основные изотопы породообразующих элементов (кислород, кальций, алюминий, кремний, углерод, натрий, калий, фосфор и др.). В связи с этим при использовании излучения с энергией до 10—12 Мэв создается возможность практически полностью исключить влияние на результаты сортировки всех основных изотопов породообразующих элементов. Выход фотонейтронов в этом случае определяется только содержанием полезных рудных компонентов.

В зависимости от энергии излучения и вещественного состава сырья реакция может идти на одном или нескольких элементах. Однако в конкретном виде минерального сырья не могут одновременно находиться все рудные элементы. В зависимости от генезиса и других геологических условий формирования каждое конкретное месторождение характеризуется определенным комплексом рудных компонентов. Например, по данным работы [52], можно выделить следующие пять основных комплексов элементов*:

1. Cu — Pb — Zn — Mo — (Au — Ag);
2. W — Mo — Sn — (As — Bi — Re);
3. Hg — As — Sb;
4. (Ti — Zr) — (Ta — Nb) — W — Sn (Bi);
5. Fe — (V — Ti) — (Co — Ni) — Cu — (Pt — Cr).

Из приведенных данных следует, что в сырье каждого типа находится от 2 до 5—7 рудных элементов. В отдельных типах руд отмеченные комплексы, как правило, повторяются с небольшими отклонениями. Знание состава таких ассоциаций элементов и вида корреляционной связи между ними позволяет более обоснованно выбирать условия облучения рудного сырья для его последующей сепарации по величине выхода фотонейтронов. Так как элементы, входящие в ассоциации, различаются между собой по относительному содержанию (иногда в 10—100 раз),

* В скобках даны второстепенные элементы генетических ассоциаций.

величине порога, сечению реакции (γ, n) и некоторым другим параметрам, то вероятность того, что выход фотонейтронов при энергии тормозного излучения до 8—10 Мэв в основном определится присутствием в руде только одного элемента (или двух, но удовлетворительно корреляционно связанных между собой), значительно возрастает.

В заключение отметим, что среди изотопов с порогом реакции ниже 11—13 Мэв находятся изотопы некоторых породообразующих элементов. К ним относятся: O^{17} (распространенность 0,037%, порог реакции 4,14 Мэв), C^{13} (распространенность 1,11%, порог реакции 4,95 Мэв) и дейтерий (распространенность 0,015%, порог реакции 2,23 Мэв). Остановимся на оценке влияния этих изотопов на селективность сепарации полезных ископаемых фотонейтронным методом. Дейтерий в рудах связан с присутствием в них кристаллической и свободной воды. Содержание кристаллической воды в рудах, как правило, не превышает долей процента, а влажность руд меняется в пределах от 1—2 до 5—10%. Соответственно этому содержание дейтерия в рудах колеблется в пределах от 0,001 до 0,020%.

Содержание углерода в различных видах полезных ископаемых может значительно различаться. Так, в рудах его содержится обычно от долей процента до нескольких процентов, достигая в отдельных случаях 10% и более. Соответственно содержание изотопа C^{13} в рудах составляет примерно 0,001—0,011% и в редких случаях — 0,1%. Содержание углерода в углях достигает 30—70% (по C^{13} — 0,33÷0,78%). В этом случае реакция (γ, n) на изотопе C^{13} может быть использована для обогащения угля по содержанию в нем углерода.

Кислород — один из наиболее распространенных элементов, и содержание его в рудах колеблется от 10—20 до 60—70%, что соответствует содержанию изотопа O^{17} от 0,004 до 0,026%.

Проведенный обзор показывает, что все три изотопа содержатся в рудах в малых количествах (в пределах от тысячных до первых сотых долей процента). Различия кусков по содержанию этих изотопов, даже если относительные отклонения будут составлять $\pm 50\%$ средних значений, очевидно, не могут существенно повлиять на результаты сепарации руд, так как эти колебания относятся к низким содержаниям, которые примерно в 10 раз меньше, чем граничное содержание полезного компонента, по содержанию которого производится сепарация сырья. Из изложенного следует, что при сепарации сырья по содержанию многих рудных элементов наличие дейтерия, C^{13} и O^{17} в рудах не может оказать существенного влияния на результаты. Этот вывод подтверждается также материалами работы [58]. Естественно, что в каждом конкретном случае оценку влияния дейтерия, C^{13} и O^{17} на результаты сепарации необходимо уточнять для данного состава руды и условий облучения.

Применение ускорителей для облучения бериллиевых и урановых руд позволяет повысить чувствительность сепараторов до уровня, приведенного в табл. 2.8. Резерв чувствительности, возникающий при использовании этого метода, может быть использован для снижения границы крупности сортируемых классов до 10 (5) мм с одновременным повышением производительности сепараторов до 100—500 кусков в секунду при покусковом режиме сепарации.

Аналогичный уровень чувствительности сепараторов может быть получен и при переработке ртутных, свинцовых, вольфрамовых, оловянных и других руд.

Таблица 2.8

Уровень чувствительности сепараторов при использовании ускорителей со средним током на мишени 100 мкА

Руды	Максимальная энергия излучения, Мэв	Класс крупности, мм ¹	Чувствительность, имп/(сек·г)
Бериллиевые	4—6	—200+50	1 400—2 000
		—50+25	6 000—8 000
		—25+15	8 000—11 000
		—15+10	8 000—11 000
Урановые	7—10	—25+10	20 000—60 000

4. АКТИВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

Среди активационных методов обогащения полезных ископаемых наиболее широко изучены нейтронно-активационные. Однако, несмотря на большой объем исследований [27, 34, 57, 61, 63, 64, 68, 70, 77, 87, 89, 92, 93, 95, 98], в литературе пока не имеется сведений о промышленных разработках этих методов. Еще в меньшей мере разработаны активационные методы сепарации, основанные на облучении руд γ -квантами и другими частицами, хотя для их развития имеются физические и технические предпосылки. В связи с этим основное внимание в разделе уделено принципиальным возможностям и некоторым особенностям процесса сепарации сырья нейтронно-активационными методами. При этом помимо их физических основ излагаются результаты отдельных исследований по применению этих методов для сепарации отдельных видов минерального сырья.

Физические основы нейтронно-активационных методов

Нейтронно-активационные методы обогащения полезных ископаемых основаны на использовании различий в потоках искусственного излучения, испускаемого отдельными кусками после их облучения нейтронами.

Образующиеся при нейтронных реакциях радиоактивные изотопы, как правило, β -излучатели. Многие из них одновременно с испусканием β -частиц излучают и γ -кванты, а распад некоторых изотопов сопровождается испусканием так называемых запаздывающих нейтронов. Соответственно изложенному сепарация кусков руды, облученных нейтронами, может производиться по различию потоков γ -, β - или нейтронного излучений, испускаемых кусками руды (γ -, β - и нейтронные методы). Наиболее широкое распространение получают нейтронно-активационные методы, основанные на регистрации γ -излучения.

Для активации руд в зависимости от задач и условий проведения облучения и сепарации конкретного вида минерального сырья применяют изотопные источники нейтронов (см. табл. П.4—П.6), а также генераторы нейтронов, нейтронные размножители, реакторы и т. п. Практически почти во всех случаях руды облучают немонотонными нейтронами. Это предопределяет возможность одновременного протекания на одном и том же изотопе двух и более видов реакций. Например, при облучении фтора нейтронами с широким энергетическим спектром, могут одновременно протекать реакции (n, γ) , (n, p) и (n, α) с образованием соответственно изотопов F^{20} , O^{19} и N^{16} . Если учесть, что вещество каждого куска руды содержит до 10—20 и более различных химических элементов, то общий поток излучения, испускаемого активированными кусками, может создаваться большим количеством изотопов. При этом основной вклад в суммарную радиоактивность руды обычно вносят один—три элемента [34, 40]. В некоторых случаях удается подобрать такие условия облучения и регистрации излучения активированных кусков, при которых обеспечивается выделение излучения лишь требуемого изотопа.

Количество каждого из радиоактивных изотопов (в *мг-экв* Ra), образовавшихся в процессе осуществления одной из ядерных реакций, ориентировочно можно определить по формуле:

$$D = 0,27 \cdot 10^{-7} \Gamma S_k [1 - \exp(-n\sigma_i x)] \times \\ \times [1 - \exp(-vt_0/T)] \exp(-vt_b/T), \quad (2.12)$$

где Γ — гамма-эквивалент изотопа, *мг-экв* Ra; n — число ядер облучаемого изотопа в 1 *см*³ куска руды, *см*⁻³; x — средняя толщина куска, *см*.

Как следует из формулы (2.12), количество изотопа, образующегося при облучении сырья нейтронами, определяется плотностью потока нейтронов, сечением активации изотопа, его содержанием в куске, временем облучения и выдержки, а также размерами куска.

В табл. 2.9 приведены результаты расчета по 15 наиболее благоприятным для активации химическим элементам. При вычислениях приняты: плотность потока тепловых нейтронов —

Нейтронно-активационные характеристики некоторых химических элементов

Химический элемент	Исходный изотоп		Получаемый изотоп				Количество радиоактивного изотопа, образующегося в куске руды, $мг-экв Ra$
	массовое число	распространенность, %	массовое число	период полураспада, сек	гамма-эквивалент изотопа, $мг-экв Ra$	макроеделение активности, $сж^2/г$	
Hf	177	18,50	178	4,8	0,59	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Hf	178	27,14	179	19,0	0,14	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$
Итого . . .	—	45,64	—	—	0,73	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$11,4 \cdot 10^{-5}$
Sc	45	100,0	46	19,5	0,064	$1,34 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$
In	115	95,72	116	3240	1,61	0,777	$7,4 \cdot 10^{-5}$
V	51	99,76	52	226	0,857	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
W	182	26,41	183	5,1	0,056	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
Se	76	9,02	77	17,5	0,23	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Al	27	100,0	28	139	1,006	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
Mn	55	100,0	56	9309	0,986	0,15	$3,1 \cdot 10^{-6}$
F	19	100,0	20	11,36	0,572	$1,84 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Eu	151	47,82	152	33120	0,161	2,66	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Cl	37	24,47	38	0,74	0,444	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Cu	65	30,91	66	306	0,060	$5,15 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
Gd	160	21,6	161	223	0,257	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Co	59	100,0	60	628	$0,24 \cdot 10^{-2}$	0,163	$1,2 \cdot 10^{-7}$
Ir	193	62,7	194	70920	1,17	0,25	$1,2 \cdot 10^{-7}$

$1 \cdot 10^7$ нейтрон/(сек·см²), масса кусков — 100 г, содержание каждого из химических элементов в куске руды — 1,0%, продолжительность облучения — 1 сек, а выдержки — 0. В расчетах учитывалась только реакция (n, γ), так как количество радиоактивных изотопов, возникающих по другим реакциям, оказывается менее 10^{-8} мг-экв Ra. Из приведенных данных следует, что наиболее сильно активируются некоторые редкоземельные элементы, а также ванадий, алюминий, марганец, фтор и др. Материалы табл. 2.9 позволяют проводить ориентировочную оценку количества возникающих радиоактивных изотопов в зависимости от вещественного состава руд и плотности потока тепловых нейтронов.

В зависимости от типа сырья необходимая плотность потока медленных нейтронов для облучения кусков руды должна быть в пределах от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^{10}$ нейтрон/(сек·см²) [34, 68, 95].

Возможности и области применения нейтронно-активационных методов в значительной мере определяются вещественным составом руд, который в целом можно характеризовать значениями макросечений рассеяния, поглощения и активации. В частности, связь макросечений поглощения и активации с вещественным составом пород фосфатного, силикатного и железокarbonатного типов отражена в табл. 2.10. Более подробный анализ показал (табл. 2.11), что комплекс элементов, создающих наибольший вклад в поглощение нейтронов, существенно меняется в зависимости от вещественного состава породы. Набор элементов, создающих основной вклад в сечение активации и активность пород, более однороден. Во всех изученных типах пород сильно активируются алюминий и марганец, и лишь в зависимости от специфики вещественного состава в этот перечень добавляются редкоземельные элементы, ванадий и др.

Многие элементы, находящиеся в рудах, поглощая нейтроны, не активируются или образуют изотопы с большими периодами полураспада. В обоих случаях нейтроны исключаются из общего потока, иногда существенно ослабляя его. Особенно этот процесс заметен при активации тепловыми нейтронами. Такое по-

Таблица 2.10

Макросечения поглощения и активации для пород с различным вещественным составом

Вещественный состав	Макросечение, см ⁻¹		Отношение сечений поглощения и активации
	поглощения	активации	
Фосфатный	0,0087	0,0015	5,4
Силикатный	0,0100—0,0118	0,0016—0,0019	6,2—7,1
Железокarbonатный	0,0345—0,0510	0,0012—0,0019	21,0—39,3

Таблица 2.11

Вклад основных элементов в нейтронно-активационные параметры пород, %

Породы	Элемент	Макросечение		Активность породы
		поглощения	активации	
Фосфатные	Ca	46	—	—
	Mn	13	72	8
	P	11	—	—
	Fe	11	—	—
	Al	—	19	87
Силикатные	Si	21—31	—	—
	K	22—30	—	—
	Fe	19—27	—	—
	Al	—	48—56	88
	Na	—	8—24	—
	Mn	—	6—22	8
Железо-карбонатные	Fe	59—85	—	—
	TR	10—27	5—10	—
	Na	—	25—44	—
	Mn	—	22—32	11
	V	—	6—20	18
	Al	—	14—16	63

глощение нейтронов в образцах приводит к уменьшению активации за счет так называемого эффекта самоэкранирования [1], интенсивность проявления которого в значительной степени определяется геометрическими условиями расположения образца в нейтронном поле данной конфигурации, формой и размером образца, а также неравномерностью распределения сильнопоглощающих ядер в рудном куске.

Количественно величину эффекта можно выразить через пространственный коэффициент самоэкранирования, определяемый как отношение $\Phi_i/\Phi_0=g$, где Φ_0 — поток нейтронов в экспериментальном канале в отсутствие образца, Φ_i — средний поток нейтронов в образце, помещенном в экспериментальный канал. Расчет эффекта самоэкранирования сложен, и обычно для его оценки используют эмпирические данные. Для ориентировочной оценки можно воспользоваться материалами работ [1, 94], на основе которых составлена табл. 2.12. При этом устанавливается, что величина g (или соответственно Φ_i) зависит от произведения макросечения активации на радиус образца ($\Sigma_{\text{акт}} \cdot r$).

Полученные данные позволяют оценивать максимально возможные размеры кусков, которые можно активировать без существенного снижения потока нейтронов. Так, если принять допустимым изменение потока нейтронов при облучении руды

Таблица 2.12

Зависимость пространственного коэффициента самоэкранирования от размеров образцов (куски приняты за шар с радиусом r)

Диаметр куска, мм	Радиус r , см	Руды фосфатного и силикатного типов ($\Sigma_a=0,010 \text{ см}^{-1}$)		Железо-углеродистые руды ($\Sigma_a=0,040 \text{ см}^{-1}$)	
		$\Sigma_a \cdot r$	g	$\Sigma_a \cdot r$	g
0	0,0	0,000	1,00	0,000	1,000
10	0,5	0,005	0,997	0,020	0,986
20	1,0	0,010	0,993	0,040	0,978
25	—	—	—	0,050	0,963
30	1,5	0,015	0,990	0,060	0,955
40	2,0	0,020	0,986	0,080	0,942
50	—	—	—	0,100	0,929
60	3,0	0,030	0,978	0,120	0,915
80	4,0	0,040	0,971	0,160	0,890
100	5,0	0,050	0,963	0,200	0,865
200	10,0	0,100	0,929	0,400	0,755
400	20,0	0,200	0,865	0,800	0,590

не более чем на 10%, то верхний предел крупности для руд силикатного и других типов составляет 200—300 мм, а для железокarbonатных руд — 60—80 мм (максимально допустимые массы руды для одновременного облучения будут равны соответственно 3—5 кг и 300—500 г). Таким образом, элементный состав (макросечение поглощения) в значительной мере определяет верхний предел крупности кусков при нейтронно-активационных методах обогащения или максимально допустимую массу кусков (порций) для облучения.

Наиболее благоприятные условия реализации процесса сепарации облученных руд следующие: большое сечение активации основного элемента, значительное содержание активируемого изотопа в естественной смеси данного элемента, короткий период полураспада образующегося изотопа (от долей секунды до нескольких минут), отсутствие мешающих элементов, т. е. элементов, близких по своим нейтронным свойствам к основному элементу. При активации тепловыми нейтронами основной мешающий элемент при обогащении многих руд — алюминий. В некоторых случаях влияние мешающих элементов можно устранить полностью или частично, используя их различие с основным элементом в периодах полураспада, видах излучения и его энергетическом спектре.

Сепарация различных видов полезных ископаемых

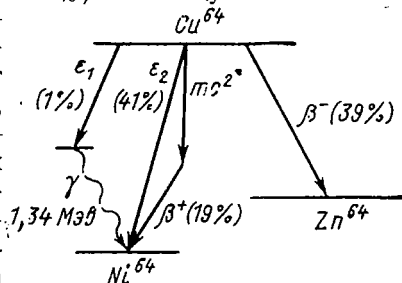
Сепарация медных руд [92]. Естественная медь состоит из двух изотопов Cu^{63} и Cu^{65} . При облучении меди тепловыми нейтронами возникают радиоактивные изотопы Cu^{64} и Cu^{66}

Нейтронно-активационные характеристики изотопов меди

Исходный изотоп	Распространенность, %	Сечение активации тепловыми нейтронами, барн	Образующиеся изотопы	Период полураспада	Вид излучения, энергия, Мэв (выход, %)	
					β	γ
Cu^{63}	69,0	4,5	Cu^{64}	12,88 ч	$\beta^- 1,573(38)$ $\beta^+ 0,66(19)$	0,51(38) 1,317(0,43)
Cu^{65}	31,0	1,8	Cu^{66}	5,1 мин	$\beta^- 2,63(91)$ 1,65(9)	1,04(9)

(табл. 2.13, рис. 2.12). Одновременно с медью активируются и другие элементы, содержащиеся в рудах. При исследовании характерного для одного из типов медных руд образца, оказалось, что основной вклад (более 94%) в общую активность куска создают два изотопа (Al^{28} — 68,8% и Cu^{66} — 25,9%). Значительно меньший вклад создают изотопы Si^{31} , Cu^{64} , Mn^{56} , Na^{24} , Mg^{27} и Ti^{51} . Все они, кроме Si^{31} , — γ -излучатели. На основе других опытов выявили, что медные руды, предназначенные для сепарации, достаточно облучать нейтронами с плотностью потока 10^9 — 10^{10} нейтрон/(сек·см²) и что полная активность кусков изменяется линейно с увеличением их массы. Однако эта зависимость при больших размерах образцов может быть ограничена эффектом самоэкранирования нейтронов.

Для решения вопросов радиационной безопасности работ с активированной рудой важное значение имеет величина спада интенсивности ее общего излучения. Исследования с образцами, облученными в течение 5 сек в потоке с плотностью $5 \cdot 10^{13}$ нейтрон/(сек·см²), показали, что через 3 ч активность руд снижается в 10 раз, через 50 ч — в 100 раз и через 100 ч — в 1000 раз. После этого очень слабая активность, обусловленная изотопом Fe^{59} ($T_{1/2}=45$ дней) и другими неопознанными изотопами с периодом полураспада более 100 дней сохраняется в течение сравнительно долгого времени. Авторы отмечали, что при промышленном применении метода руды будут облучаться в потоке с плотностью (10^9 — 10^{10}) нейтрон/(сек·см²), а время облучения значительно уменьшится. Поэтому считается, что искусственная радиоактивность руд через 2—3 дня после облучения будет уменьшена до уровня, близкого к фону.

Рис. 2.12. Схема распада изотопа ^{64}Cu .

На основе проведенных исследований установлены три возможных варианта регистрации γ -излучения кусков руды для их разделения по содержанию меди: 1) измерение общего γ -излучения активированных кусков руды; 2) выделение с помощью дискриминации импульсов, соответствующих γ -квантам с энергией 0,511 Мэв, испускаемых изотопом Cu^{64} ; 3) измерение аннигиляционного излучения методом совпадений.

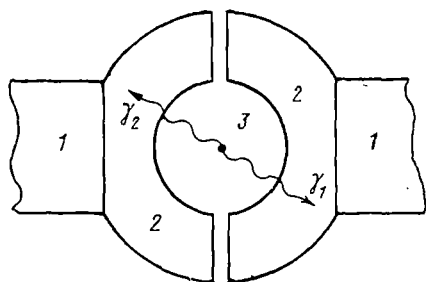
Способ разделения кусков руды по общему γ -излучению оказался малоприменимым, так как при этом всегда возможны большие погрешности из-за одновременной регистрации излучения изотопов меди и других элементов, содержащихся в руде (в первую очередь, алюминия).

Экспериментально доказана возможность разделения руд по регистрации γ -излучения (0,511 Мэв) изотопа Cu^{64} . Однако при промышленном использовании, по мнению авторов, этот способ не удобен.

Для практической реализации метода сепарации медных руд

Рис. 2.13. Схема сцинтилляционного детектора:

1 — фотоумножитель; 2 — сцинтиллятор; 3 — отверстие для пролета кусков.



выбран третий вариант регистрации излучения активированных кусков руды. Этот вариант удобен тем, что среди всех искусственных изотопов, образующихся в рудах, имеется только один изотоп (Cu^{64}), испускающий позитроны (см. рис. 2.12). Последние, взаимодействуя с окружающей средой, аннигилируют с образованием двух квантов с энергией по 0,511 Мэв каждый. Для регистрации аннигиляционного излучения имеются практичные и сравнительно дешевые детекторы, а применение при этом схемы совпадений позволяет добиться очень низкого фона даже при использовании больших кристаллов.

На рис. 2.13 показано устройство сцинтилляционного детектора для счета совпадений, позволяющего осуществлять регистрацию излучения свободно падающих рудных частиц. Суть метода регистрации заключается в следующем. При взаимодействии позитрона с одним из электронов среды освобождаются два γ -кванта с энергией по 0,511 Мэв, которые разлетаются в противоположных направлениях. Пластмассовый сцинтиллятор диаметром 254 мм и длиной 330,2 мм сделанный из поливинилтолуола, имеет отверстие диаметром 63,5 мм. Сцинтиллятор разрезан вдоль оси на две равные самостоятельные половины, что позволяет регистрировать по схеме совпадений аннигиляционные γ -кванты, разлетающиеся в разных направлениях.

Конструкция сортировочной машины (рис. 2.14) обеспечивает пролет в свободном падении активированных кусков руды через трубчатый сцинтилляционный детектор и регистрацию γ -излучения методом совпадений. Сцинтиллятор установлен вертикально на столе высотой 764 мм. Разделяющее устройство расположено на высоте 381 мм от пола. Активированные куски руды падают в измерительный канал с питателя 1. Общая длина пути каждой рудной частицы через регистрирующее устройство

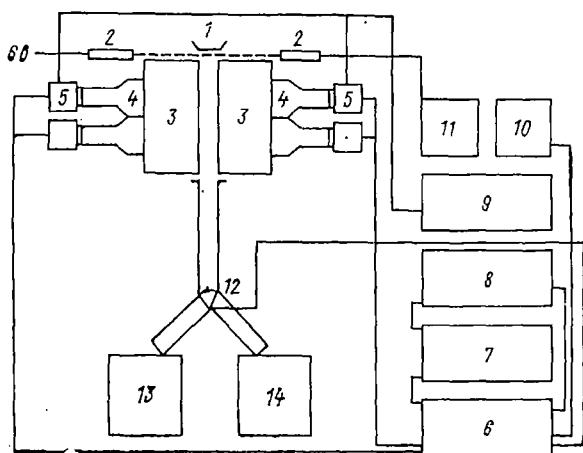


Рис. 2.14. Схема сортировочной установки:

1 — питатель; 2 — фотоэлемент и источник света; 3 — пластмассовый сцинтиллятор; 4 — фотоумножитель; 5 — предусилитель; 6 — селектор совпадений; 7 — счетчик общего излучения; 8 — счетчик совпадений; 9 — высоковольтный блок; 10 — таймер; 11 — фотоэлектрическое реле; 12 — шиббер; 13 — хвосты; 14 — концентрат.

равна 711,2 мм. Расстояние от питателя до детектора составляет 50,8 мм. Время пролета куска через сортировочное приспособление 0,394 сек, из которых 0,178 сек (45% общего времени) приходится на канал в сцинтилляторе.

Процесс сепарации осуществляется следующим образом (см. рис. 2.14). Активированные куски руды, падая с питателя, пересекают световой поток, воздействующий на фотоэлемент. В результате этого происходит запуск схемы совпадений, которая считает электрические импульсы до набора заданного числа совпадений. Это число (настройка) определяется расчетом на основе данных об активации, принятого граничного содержания меди и эффективности счетчика. При наборе заданного числа совпадений счетчик посылает сигнал, который приводит в движение шибберное (разделяющее) устройство. К этому времени кусок руды пролетает счетчик и направляется через открытый шиббер в концентрат. Через несколько сотых долей секунды после

прохождения первой частицы через шибберное устройство вся система приходит в первоначальное состояние и готова к приему следующего куска руды. Если активность этой частицы окажется ниже заданной, то детектирующая система не дает сигнал на шиббер и частица направляется в хвосты. Установка автоматически переходит в исходное состояние и т. д. Градуировка прибора осуществляется изотопом Na^{22} (0,054 мккюри). Средний уровень регистрируемого фона в отсутствие защиты около 13 *имп/сек*, со свинцовой защитой толщиной 50,8 мм — 5 *имп/сек* или 1 *имп* за экспозицию.

При размещении ФЭУ диаметром 50,8 мм только в верхнем крайнем положении наиболее чувствительный участок канала находится на расстоянии от 6 до 9 см от вершины детектора. В направлении основания чувствительность канала уменьшается почти линейно, и у основания составляет 23% максимальной, соответствующей 45 *имп/сек* (10% от полного числа аннигиляций).

При размещении ФЭУ с фотокатодом диаметром 127 мм на расстоянии примерно 5 см от вершины детектора, точка, соответствующая наибольшему значению скорости от источника Na^{22} , находится на расстоянии около 10 см от вершины детектора. Здесь регистрируется 19% всех возможных совпадений. Использование двух таких ФЭУ на каждом сцинтилляторе позволяет увеличить чувствительность детектирующего устройства. В опытах установили, что данная детектирующая система позволяет определять содержание меди за время меньшее, чем 0,025 сек.

Массу кусков учитывают, регистрируя общую интенсивность их излучения, которая в первом приближении пропорциональна массе кусков. Импульсы, возникающие на ФЭУ и соответствующие общей интенсивности излучения активированных кусков, считаются в дополнительном приборе (прибор 7 на рис. 2.14), введенном в общую схему регистрирующего узла установки. Время набора полезных импульсов в схеме совпадений изменяется в зависимости от времени набора прибором 7 заданного числа импульсов (например, 10^4). Чем больше масса куска, тем больше интенсивность общего γ -излучения и тем меньше требуется времени для набора заданного числа импульсов. Число импульсов, зарегистрированных за это время в схеме совпадений, будет соответствовать истинному содержанию меди в куске с учетом его массы.

При опытной переработке медной руды на такой установке были получены хвосты, содержащие 0,2—0,3% Cu [93].

Сепарация флюоритовых руд. Характеристика радиоактивных изотопов, возникающих при облучении фтора тепловыми и быстрыми нейтронами, дана в табл. 2.14. Короткие периоды полураспада образующихся изотопов способствуют получению высокой интенсивности их β - и γ -излучения. Оценка возможностей метода выполнена для руд, представленных крупнокристал-

Таблица 2.14
Характеристика основных изотопов, образующихся при активации флюоритовых руд [1, 25]

Исходный изотоп (распространенность, %)	Энергия нейтронов, Мэв	Реакция	Сечение реакции, мбэрн	Изотоп- продукт	Период полурас- пада, сек	Энергия, Мэв (выход, %)	
						β -частиц	γ -квантов
F ¹⁹ (100)	Тепловые	n, γ	9	F ²⁰	10,7	5,419 (100)	1,632 (100)
Al ²⁷ (100)	"	n, γ	210	Al ²⁸	138	2,865 (100)	1,78 (100)
F ¹⁹ (100)	~1	n, p	0,5	O ¹⁸	29,4	4,5 (30); 2,9 (70)	1,36 (55,2)
F ¹⁹ (100)	~1	n, α	4,5	N ¹⁶	7,35	10,3 (20); 4,3 (40); 3,8 (40)	7,11 (5,0); 6,14 (68,8)
Si ²⁸ (92, 18)	~1	n, p	4	Al ²⁸	138	2,865 (100)	1,78 (100)
O ¹⁶ (99, 76)	14,5	n, p	49	N ¹⁶	7,35	10,3 (20); 4,3 (40); 3,8 (40)	7,11 (5,0); 6,14 (68,8)
F ¹⁹ (100)	14,5	n, p	135	O ¹⁸	29,4	4,5 (30); 2,9 (70)	1,36 (55,2)
F ¹⁹ (100)	14,5	$n, 2n$	60	F ¹⁸	6660	0,649 (100)	0,511 (194)
Al ²⁷ (100)	14,5	n, p	52,4	Mg ²⁷	572	1,59 (42); 1,75 (58)	1,015 (30); 0,843 (70)
Si ²⁸ (92, 18)	14,5	n, p	220	Al ²⁸	138	2,865 (100)	1,78 (100)
Si ²⁹ (4, 71)	14,5	n, p	101	Al ²⁹	402	2,5 (70); 1,4 (30)	2,43 (6,2); 1,28 (93,8)

лическим (руда I) и мелкокрапленным флюоритом (руда II), с использованием формулы (2.12). Основные результаты расчетов при облучении руд (класс — 75+50 мм) потоком тепловых нейтронов с плотностью $1 \cdot 10^7$ нейтрон/(сек·см²) при продолжительности облучения и выдержки соответственно 10 и 30 сек приведены в табл. 2.15. Расчеты показали, что основными радио-

Таблица 2.15

Вклад основных изотопов в общую активность кусков руды, облученной тепловыми нейтронами, %

Изотопы		Период полураспада, сек	Руда I	Руда II
Исходный изотоп	Получаемый изотоп			
F ¹⁹	F ²⁰	10,7	70,0	41,0
Al ²⁷	Al ²⁸	138	28,0	58,0
Ca ⁴⁸	Ca ⁴⁹	525	1,4	0,8
Mn ⁵⁵	Mn ⁵⁶	9280	—	0,1
Остальные		—	0,6	0,1
Итого		—	100	100

изотопами, образующимися в кусках руды, являются F²⁰ и Al²⁸, суммарный вклад которых в общую активность руды составляет 98—99%. Анализ полученных данных с учетом элементного состава и нейтронно-активационных характеристик руд показывает, что выявляется принципиальная возможность сепарации руд по регистрации жесткого β-излучения изотопа F²⁰. Этот изотоп испускает β-частицы с максимальной энергией 5,419 Мэв (100%). Для остальных изотопов она не превышает 2,865 Мэв (Al²⁸). Если радиометр будет регистрировать только жесткое β-излучение, процесс сепарации может

оказаться достаточно селективным.

При облучении руд нейтронами со средней энергией ~1 Мэв (средняя энергия нейтронов деления) основной вклад в активность руды дает изотоп N¹⁶, образующийся по реакции (n, α) на изотопе F¹⁹, и частично изотоп Al²⁸ — продукт реакции (n, p) на кремнии (табл. 2.16). Вклад изотопа Al²⁸ в общую активность хотя и мал (5—14%), но не настолько, чтобы им пренебречь на практике. Незначительный вклад создает та часть изотопа N¹⁶, которая образуется по реакции O¹⁶ (n, p) N¹⁶, так как среди нейтронов деления имеются (в небольшом количестве) нейтроны, энергия которых выше порога реакции (n, p) на кислороде (10.22 Мэв). В этих условиях сепарация по общему излучению кусков возможна лишь для руд с большим содержанием флюорита (более 30—40%) и малым содержанием кремния (до 10%). Наиболее перспективное направление — сепарация флюоритовых руд по жесткому γ-излучению изотопа N¹⁶, образующемуся по реакции F¹⁹ (n, α) N¹⁶. Этот изотоп (см. табл. 2.14) испускает γ-кванты с энергией 6,14 и 7,11 Мэв, что значительно превышает энергию излучения всех других изотопов. Аналогичные выводы можно сделать при анализе спектров β-излучения изотопов — продуктов нейтронных реакций на фторе (O¹⁹ и N¹⁶), максимальные энергии β-частиц которых равны соответственно 4,5 и 10,3 Мэв. Максимальные энергии других β-излучателей, обра-

Таблица 2.16

Вклад основных изотопов в общую активность кусков руды, облученной нейтронами деления, %

Реакция	Изотоп		Период полураспада, сек	Руда I	Руда II
	исходный	получаемый			
n, p	O^{16}	N^{16}	7,35	0,7	0,4
n, p	F^{19}	O^{19}	29,4	3,4	3,7
	Si^{28}	Al^{28}	138	13,7	5,1
n, p	Остальные		—	0,2	0,4
Всего по реакции (n, p)				18,0	9,6
n, α	F^{19}	N^{16}	7,35	81,9	90,37
n, α	Остальные		—	0,1	0,03
Всего по реакции (n, α)				82,0	90,4
Всего продуктов реакций					
а) на фторе				85,3	94,07
б) на остальных изотопах				14,7	5,93
Итого по двум реакциям				100,0	100,0

зующихся в руде, не превышают 2,865 Мэв (изотоп Al^{28}).

Расчеты, проведенные для случая облучения флюоритовых руд быстрыми нейтронами с энергией ~ 14 Мэв, показали невозможность сепарации таких руд, так как основными конкурирующими реакциями являются $F^{19}(n, \alpha)N^{16}$ (порог реакции 3,2 Мэв) и $O^{16}(n, p)N^{16}$ (порог 10,22 Мэв), ведущие к образованию одного и того же изотопа N^{16} .

При экспериментах по оценке некоторых из выявленных направлений Po—Ве-источник нейтронов размещался в специальном канале в баке с дистиллированной водой. Поток тепловых нейтронов в рабочих каналах был равен $(4 \div 7) \cdot 10^3$ нейтрон/(сек·см²), а быстрых (надкадмиевых) — $(1 \div 3) \cdot 10^3$ нейтрон/(сек·см²).

γ -Излучение активированных кусков руды и проб регистрировали сцинтилляционным счетчиком (кристалл NaI(Tl) размером 40×50). Облучению подвергали куски массой от 20 до 150 г, время облучения 10—30 сек, выдержка 5—10 сек, а продолжительность измерения 10—60 сек.

Опыты подтвердили возможность сепарации флюоритовых руд по регистрации жесткого γ -излучения изотопа N^{16} , возникающего по реакции (n, α). При дискриминации импульсов по амплитуде, соответствующей энергии 1,8 Мэв, практически пол-

ностью исключается влияние мешающих элементов, а зависимость между числом регистрируемых импульсов и содержанием флюорита оказывается линейной (рис. 2.15). Возможность реализации направлений, основанных на регистрации общего γ - или β -излучения кусков руды, будет во многом определяться вещественным составом конкретных типов руд и характером корреляционной связи между флюоритом и некоторыми мешающими элементами (Al, Si и др.). Экспериментальные данные о чувствительности разновидностей нейтронно-активационного метода обогащения флюоритовых руд для кусков со средней массой 100 г (класс —50 +25 мм) для продолжительности облучения и выдержки по 5—10 сек, регистрации 1 сек приведены в табл. 2.17. Наиболее перспективный из указанных в таблице вариантов — сепарация руд по регистрации жесткого γ -излучения активированных быстрыми нейтронами кусков руды при условии, что энергия нейтронов не превышает 10,22 Мэв, т. е. порога реакции $O^{16}(n, p)N^{16}$.

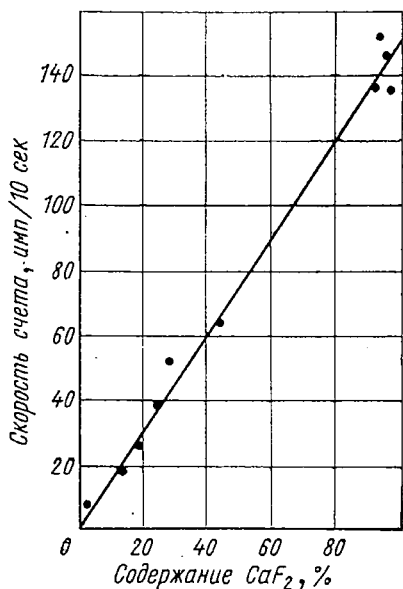


Рис. 2.15. Зависимость скорости счета жесткого γ -излучения активированных проб от содержания флюорита.

Для реализации любого из вариантов сепарации флюоритовых руд с учетом предполагаемой величины граничного содержания (10—15% CaF_2) необходимо иметь величину Q_c , равную 20—100 имп/(сек·г) фтора. В этом случае для сортировки флюоритовых руд (по регистрации общего γ - или β -излучения),

Т а б л и ц а 2.17
Статическая чувствительность Q_c отдельных разновидностей нейтронно-активационного метода обогащения флюоритовых руд (источник с выходом 10^9 нейтрон/сек)

Канал нейтронного блока	Регистрируемое излучение	Q_c , имп/(сек·г)
Тепловой	Общее гамма	25—50
»	Общее бета	15—35
Кадмиевый	Общее гамма	60—100
»	Жесткое гамма	10—20

активированных тепловыми или надкадмиевыми нейтронами, достаточно использовать изотопные источники, дающие выход порядка $5 \cdot 10^8$ — $5 \cdot 10^9$ нейтрон/сек, что соответствует плотности потока тепловых или быстрых нейтронов в зоне облучения порядка $5 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^6$ нейтрон/(сек·см²). Для сортировки руд по регистрации жесткого γ - или β -излучения требуются более мощные источники нейтронов с выходом порядка 10^9 — 10^{10} нейтрон/сек или плотностью потока быстрых нейтронов примерно 10^6 — 10^7 нейтрон/(сек·см²). Отсюда следует, что для облучения

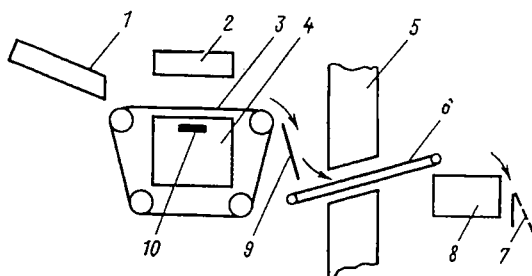


Рис. 2.16. Принципиальная схема установки для сепарации флюоритовых руд:

1 — питатель; 2 — отражатель нейтронов; 3 — транспортер; 4 — парафиновый блок; 5 — защитная стена; 6 — транспортер; 7 — разделяющее устройство; 8 — ленточный сепаратор; 9 — желоб; 10 — источник нейтронов.

флюоритовых руд могут использоваться изотопные источники с выходом более 10^8 нейтрон/сек, нейтронные размножители и генераторы нейтронов, работающие на основе реакции (d, d) .

Схема установки для сепарации флюоритовых руд нейтронно-активационным методом дана на рис. 2.16. Подготовленная для облучения руда определенной крупности подается питателем в узел облучения, представляющий компоновку ленточного транспортера, источников нейтронов, материалов, замедляющих нейтроны и защитных устройств. Скорость перемещения руды через узел облучения выбирается такой, чтобы время облучения было в пределах до 1—3 сек. Активированная руда с помощью быстродвижущегося конвейера (скорость около 1 м/сек) поступает непосредственно на многоканальный ленточный сепаратор. При этом важно обеспечить точное соблюдение заданного времени выдержки, которое должно быть не более 5—10 сек. Облучение и разделение рудных кусков по содержанию в них флюорита в зависимости от вещественного состава, крупности и контрастности руды может производиться по любой из описанных выше разновидностей нейтронно-активационного метода обогащения флюоритовых руд.

Сепарация радиоактивных руд. Природный уран состоит из трех изотопов с атомными массами 234, 235 и 238, распростра-

ненность которых равна соответственно 0,0057; 0,714 и 99,3%. На изотопах урана наиболее вероятны реакции (n, γ) , $(n, 2n)$, а также реакция деления (n, f) [69]. Первые две реакции не приводят к образованию сильных γ - или β -излучающих и короткоживущих изотопов, и на их основе не может быть осуществлена сепарация руд. Реакция деления идет на изотопе U^{235} под действием тепловых нейтронов (сечение реакции 580 барн) и на изотопе U^{238} под действием быстрых нейтронов с энергией около 1 Мэв и выше (сечение реакции 0,5—0,6 барн при энергии нейтронов 3—5 Мэв) [69]. Простые расчеты на основе приведенных данных показывают, что при одинаковых потоках тепловых и быстрых нейтронов на основе реакции (n, f) на U^{235} можно получить более высокую чувствительность, чем при использовании той же реакции на U^{238} .

Продукты деления U^{235} представляют собой смесь различных изотопов с атомными массами от 70 до 160 и периодами полураспада от долей секунды до сотен лет. Эффективный период полураспада этой смеси в первые минуты после деления численно примерно равен интервалу времени, прошедшему после деления [41]. Продукты деления, резко отличаясь от других изотопов периодами полураспада и энергией излучения, являются удобными индикаторами содержания урана в активированных кусках руды. Большая энергия β -частиц и γ -квантов, которая достигает 5—6 Мэв [69, 94], обеспечивает возможность сепарации руд по интенсивности жесткого излучения (примерно выше 2 Мэв). В этом случае практически полностью исключается влияние мешающих изотопов (алюминий и др.).

В зависимости от потока нейтронов интенсивность излучения продуктов деления в десятки и сотни раз может превышать интенсивность естественного излучения руд (табл. 2.18). Это дает возможность обогащать руды крупностью более 25 мм со значительно более высокой производительностью, чем при их радиометрической сепарации, а самое главное — вовлечь в обогащение мелкие классы крупностью — 25+10 (5) мм, которые

Таблица 2.18

Чувствительность узла регистрации установок для сепарации руд на основе реакции деления [плотность потока тепловых нейтронов $1 \cdot 10^8$ нейтрон/(сек·см²)]

Масса кусков, г	Величина параметров Q_c по радиовактивности, имп/(сек·г)	
	естественной	искусственной (γ -излучение продуктов деления)
30	1500—2000	30 000—58 000
10	2000—3000	44 000—80 000
3	2800—4000	59 000—110 000

не обогащаются на основе использования их естественной радиоактивности.

Сепарацию облученных руд можно осуществить по регистрации суммарного или жесткого γ - или β -излучения, а также нейтронного излучения активированных кусков руды. При содержании мешающих элементов не выше 2—3% экв Al имеется возможность получить удовлетворительные результаты и при сепарации по общему γ - или β -излучению кусков руды (рис. 2.17) [34]. Приведенные показатели относятся к руде со средними содержаниями: алюминия — менее 1%, ванадия и урана — 0,2—0,32%. В зависимости от вещественного состава, вида корреляционной связи между ураном и мешающими элементами, а также крупности сортируемых классов, плотность потока нейтронов, необходимая для облучения руд, изменяется в пределах от 10^7 до 10^{10} нейтрон/(сек·см²).

Сепарация марганцевых руд. Характеристики основных изотопов, содержащихся в марганцевых рудах и активирующихся при облучении руд нейтронами, сведены в табл. 2.19. В послед-

Таблица 2.19

Характеристики основных изотопов, возникающих при облучении марганцевых руд тепловыми и быстрыми (примерно 14 Мэв) нейтронами

Нейтроны	Изотоп (распространенность, %)	Реакция	Сечение, барн	Образующийся изотоп	Период полураспада	Энергия γ -квантов (Мэв) и их выход (%)	Активность, расн/сек
Тепловые	Al ²⁷ (100,0)	n, γ	0,215	Al ²⁸	2,27 мин	1,78 (100)	2440
»	Mn ⁵⁵ (100,0)	n, γ	13,3	Mn ⁵⁶	2,58 ч	0,845 (99); 1,81 (24) и др.	1090
»	Si ³⁰ (3,13)	n, γ	0,110	Si ³¹	2,62 ч	1,26 (0,07)	0,56
Быстрые	O ¹⁶ (99,76)	n, p	0,09	N ¹⁶	7,35 сек	6,13; 7,13	32000
»	Si ²⁸ (92,16)	n, p	0,22	Al ²⁸	2,27 мин	1,78 (100)	2200
»	Na ²³ (100,0)	n, p	0,034	Ne ²³	40,2 сек	0,44 (32)	1500
»	Mn ⁵⁵ (100,0)	n, α	0,030	V ⁵²	3,76 мин	1,43 (100)	100

ней колонке таблицы показана активность, возникающая при облучении 1 г химического элемента в потоке (соответственно тепловых или быстрых нейтронов) с плотностью 10^9 нейтрон/(сек·см²) [87].

Природный марганец представлен одним изотопом Mn⁵⁵. Сечение реакции (n, γ) на этом изотопе для тепловых нейтронов составляет 13,3 барн. Образующийся изотоп Mn⁵⁶ ($T=2,58$ ч) испускает β -частицы с энергией до 2,86 Мэв и γ -кванты, энергия которых равна 0,845; 1,81 и 2,12 Мэв. Другие нейтронные реакции на марганце не имеют практического значения.

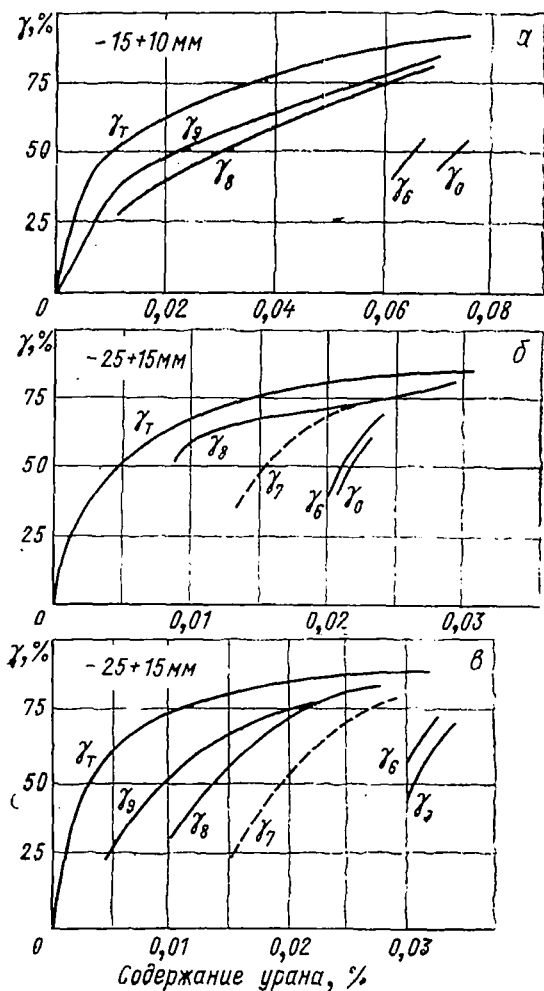


Рис. 2.17. Зависимость выхода хвостов от содержания в них полезного компонента при сепарации руд по регистрации γ -излучения (а и б) и β -частиц (в):

γ_T — теоретический выход хвостов; γ_0 — фактический выход хвостов при сепарации по естественному γ -излучению; γ_9 , γ_7 , γ_8 , γ_6 — расчетный выход хвостов при сепарации руд по излучению продуктов деления при облучении сырья потоками нейтронов соответственно $1 \cdot 10^9$, $1 \cdot 10^7$, $1 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^3$ нейтрон/(сек \cdot см 2).

Анализ вещественного состава марганцевых руд показывает, что принципиально для сепарации руд может быть использовано γ -излучение Mn^{56} (прямой способ сепарации), а также γ -излучение изотопа Al^{28} , возникающего по реакции $Si^{28}(n, p)Al^{28}$ при облучении руд быстрыми нейтронами с энергией примерно 14 Мэв (косвенный метод сепарации). Сепарация марганцевых руд по содержанию кремния возможна лишь при достаточно четкой линейной зависимости между содержанием в кусках руды марганца и кремния.

Некоторые вопросы использования этих реакций рассмотрены в работе [87]. В частности, изучены условия облучения и сепарации руд на макете установки, которая оснащена изотопным источником нейтронов (Po—Be) и сцинтилляционным детектором γ -излучения, помещенными под быстродвижущейся лентой, нагруженной рудным материалом. Преимущества такого способа облучения и регистрации заключаются в постоянстве траектории движения рудных кусков относительно источника и детектора, а также в том, что облучению в основном подвергается самая большая из возможных поверхностей рудных кусков. Предполагается, что для увеличения доли тепловых нейтронов в их общем потоке транспортная лента может двигаться через бак с водой, которая сильно замедляет быстрые нейтроны, испускаемые Po—Be-источником. Для исключения влияния изотопа N^{16} , образующегося по реакции $O^{16}(n, p)N^{16}$ на быстрых нейтронах (порог реакции 10,22 Мэв), транспортер можно сделать достаточно длинным. Это позволит разделить моменты активации руды и регистрации излучения на время, достаточное для практически полного распада изотопа N^{16} , период полураспада которого равен 7,35 сек.

Эксперименты проведены на макетах предполагаемых узлов облучения и измерения. Источник нейтронов располагался непосредственно под транспортной лентой в цилиндрическом углублении в верхней части парафинового блока. Над лентой размещались облучаемые пробы. Регистрация излучения активированных проб проводилась с помощью кристалла $NaI(Tl)$ диаметром 50,8 мм. При облучении в течение 10 мин порошка двуокиси марганца (масса 50 г) через несколько минут после облучения интенсивность излучения составила 12,2 *имп/сек*. При помещении описанного узла облучения в бак с водой активность составила 67 *имп/сек*. Анализ кривых распада показал, что зарегистрированная активность обусловлена изотопом Mn^{56} .

На основе подобных исследований проведены расчеты, позволившие оценить число ожидаемых импульсов от активированных кусков марганцевой руды, помещенных на движущейся транспортной ленте. Автор статьи пришел к выводу, что покусковая сортировка достаточно крупных кусков марганцевых руд, облученных тепловыми нейтронами, технически и экономически возможна.

Сепарация золотосодержащих руд. Характеристики возможных ядерных реакций на золоте (изотоп Au^{197} , распространенность 100%) приведены в табл. 2.20 [1, 72]. Анализ ее материалов и сравнение их с аналогичными характеристиками таких элементов, как кислород, кремний, алюминий и др. (см. табл. 2.14), также находящихся в рассматриваемых рудах, указывают на

Т а б л и ц а 2.20

Нейтронные реакции на золоте (Au^{197}) и характеристика их продуктов

Реакция	Энергия нейтронов, Мэв	Сечение реакции	Образующийся изотоп	Период полураспада	Энергия, Мэв (выход, %)	
					β -частиц	γ -квантов
n, γ	Тепловые	96 барн	Au^{198}	2,7 дня	0,96 (99,9) и др.	0,412 (99) и др.
n, p	а) ~ 1	20,5 мбарн	Pt^{197}	18 ч	0,67 (94);	0,077 (99);
n, α	б) 14,01 14—15	1,8 мбарн 0,3 мбарн			Ir^{194}	19,7 ч
$n, 2n$	$\sim 14,5$	1,72 барн	Au^{196}	6,2 дня	0,27 (12); ϵ (88)	0,426 (11,9); 0,354 (83); 0,332 (22,5); 0,332—1,08
$n, 2n$	$\sim 14,5$	0,23 барн	Au^{196m}	9,7 ч	Нет	ИП 0,188 (29,2); 0,149 (70); 0,084 (38)
n, n', γ	3,0	3 барн	—	—	—	0,25

малую перспективность прямых нейтронно-активационных методов сепарации золотосодержащих руд. Основная причина заключается в низких содержаниях золота в рудах, относительно длинных периодах полураспада образующихся изотопов и низкой энергии излучений.

Некоторые теоретические вопросы сепарации золотосодержащих руд и результаты их экспериментальной проверки были рассмотрены в работе [98], где исследовались условия обогащения руд при их облучении тепловыми и быстрыми (3 и ~ 14 Мэв) нейтронами. На основе теоретических и экспериментальных данных автор сделал вывод о невозможности сепарации нейтронно-активационным методом золотосодержащих руд Витватерсранда. При попытке прямого определения золота возникают большие помехи, создаваемые излучениями различных мешающих элементов. В данном случае не было также найдено ни одного элемента, который имел бы благоприятные нейтронно-активационные характеристики и тесную корреляционную связь с золотом.

Возможность сепарации золотосодержащих руд по активации алюминия была показана ранее в работах [27, 57] на при-

мере сырья одного из месторождений Восточной Сибири. Руды состояли из кварца, серых и темных сланцев. Сланцы, не содержащие золота, подлежали удалению при сортировке руд по содержанию алюминия. Для облучения использовали Po—Be -источник, обеспечивающий в точке облучения плотность потока нейтронов около 10^5 нейтрон/(сек·см²). Масса образцов изменялась от 5 до 120 г. γ -Излучение активированных проб регистрировали газоразрядными счетчиками. Относительная удельная активность образцов (в имп/мин на 1 г руды) составила по кварцу 1,6—1,7, по сросткам — от 2,6 до 2,3, по темным и серым сланцам — от 5,7 до 6,7. На основании этих результатов сделан вывод о возможности сепарации активированных золотосодержащих руд нейтронно-активационным методом на основе регистрации γ -излучения Al^{28} .

Аналогичные исследования проведены для руд другого месторождения. Особенность этих руд заключается в том, что золото содержится не только в кварце, где сосредоточена основная часть металла, но и во вмещающих породах, представленных темными и бурыми сланцами. Руду облучали (Po—Be -источник с выходом $2 \cdot 10^7$ нейтрон/сек) нейтронами смешанного энергетического спектра и быстрыми (надкадмиевыми) нейтронами. В первом случае (табл. 2.21) облучению подвергали отдельные

Таблица 2.21
Средняя активность отдельных составляющих руды,
активированных нейтронами, имп/мин

Составляющие рудной массы	Содержа- ние золота, г/т	Нейтроны	
		смешан- ного спектра	надкад- миевые
Темные сланцы	1,9	800	460
Бурые сланцы	3,6	645	440
Кварц	17,7	365	330

куски со средней массой 100 г (по 15—20 штук каждого сорта). Результаты соответствуют времени облучения 2 мин, времени выдержки 30 сек. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о преимуществе облучения кусков руды нейтронами смешанного спектра. Во втором случае (табл. 2.22) при тех же условиях нейтронами смешанного спектра облучали искусственно составленные смеси. Здесь также отмечается достаточно четкая корреляция между вещественным составом рудной массы и ее активностью после облучения нейтронами.

Приведенные материалы подтверждают принципиальную возможность сепарации некоторых золотосодержащих руд, облученных нейтронами, на основе регистрации излучения Al^{28} .

Таблица 2.22

Активность порций, состоящих из искусственных смесей сланцев и кварца (масса порций $\sim 1,0$ кг)

Состав рудной массы, %		Ориенти- ровочное содер- жание золота, г/т	Пределы из- менения актив- ности облучен- ных порций, имп/мин
Кварц	Сланцы		
0	100	2,8	3375—3570
20	80	5,8	3000—3060
40	60	8,9	2545—2710
60	40	11,9	2060—2345
80	20	15,0	745—865
100	0	17,7	275—515

Сепарация углей. Добытая угольная масса обычно состоит из кусков угля, породы и их сростков, резко различающихся по химическому составу. Уголь состоит из элементов, практически не активирующихся под действием нейтронов. Вмещающие породы (зола) обычно содержат в большом количестве алюминий, кремний и другие элементы.

Алюминий легко активируется тепловыми нейтронами по реакции $Al^{27}(n, \gamma)Al^{28}$ (сечение реакции $0,21$ барн), а кремний может быть активирован быстрыми ($14-15$ Мэв) нейтронами по реакции $Si^{28}(n, p)Al^{28}$. Сечение этой реакции составляет 250 ± 75 мбарн [1]. Анализ активационных характеристик угля и породы, проведенный в работе [63], показал, что при облучении тепловыми нейтронами алюминий будет давать основной вклад в активность кусков породы и угля. При этом общий уровень их активности оказывается пропорциональным содержанию алюминия в глинистых породах ($11-25\%$) и угле ($1-2\%$), т. е. отличается примерно на один порядок. Экспериментальная проверка этих положений подтвердила их справедливость. Полученные материалы (рис. 2.18) наглядно характеризуют возможности нейтронно-активационного метода сепарации углей. Расположение экспериментальных точек на рис. 2.18 показывает, что действительно уголь и порода резко различаются по интенсивности излучения (активность породы в среднем в $8-15$ раз превышает активность кусков угля). Изучение кривых распада облученных образцов подтвердило, что основной вклад в искусственную радиоактивность кусков дает Al^{28} , а влиянием других элементов можно пренебречь.

На основе этих и других экспериментов и соответствующих теоретических расчетов автор работы [63] совершенно правильно пришел к выводу о возможности обогащения углей нейтронно-активационным методом. Однако рассмотренный им конкретный вариант сепарации углей (порционный режим сепарации с использованием нескольких перечистных операций) не мог полу-

чить развития из-за несовершенства предложенных технологий и аппаратуры. Выявленные принципиальные возможности обогащения углей нейтронно-активационным методом могут быть реализованы лишь при покусковом режиме сепарации.

Другой вариант сепарации углей рассмотрен в работе [95]. Для этого предлагается уголь (или руду) пропускать через спе-

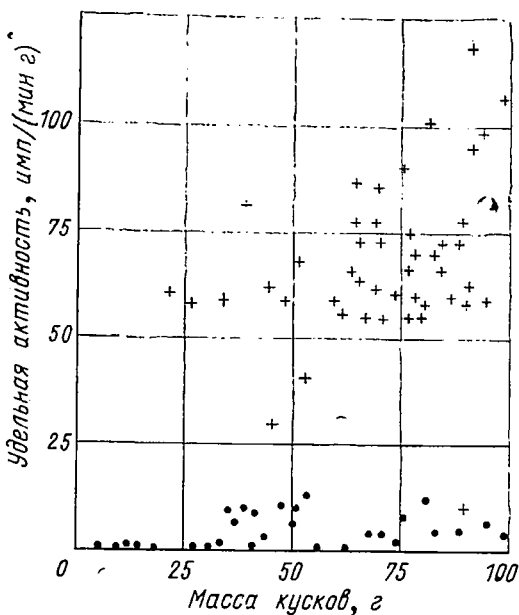


Рис. 2.18. Относительная удельная активность образцов угля (●) и породы (+).

циальные каналы, расположенные в защитной оболочке ядерного реактора, где плотность потоков нейтронов может достигать 10^9 нейтрон/(сек·см²). В результате пропуска угля через эту зону некоторые элементы (в первую очередь алюминий) будут активироваться. При облучении в течение 1 сек куса с массой 113 г (содержание золы 7—10%) его расчетная активность оказывается равной 20 000 расп/сек, что вполне достаточно для осуществления сепарации кусков угля в зависимости от содержания золы. Предполагается, что производительность облучения в описанных условиях может достигать 20 т/ч.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИИ ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СЕПАРАЦИИ

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СОРТИРОВКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В общем процессе добычи и переработки минерального сырья ядернофизические методы сепарации используют на ранних стадиях переработки добытых полезных ископаемых. Как правило, сортировка горнорудной массы начинается еще при ее добыче. Различными способами (на основе геологического опробования, с помощью визуального контроля или на основе применения экспрессных контрольных установок [34, 39, 60—62, 68, 70, 76, 82]) горнорудную массу разделяют на сорта в зависимости от содержания полезного компонента или вещественного состава (рис. 3.1). Дальнейшей переработке в принципе можно подвергать любой из выделенных сортов, если это оправдывается технико-экономическими соображениями.

Руду, предназначенную для сепарации, подвергают предварительному грохочению для выделения и дораблывания наиболее крупных кусков руды. В зависимости от применяемого метода сепарации и технологических свойств сырья максимальная крупность рудного материала, поступающего на сортировку, может меняться в широких пределах (от 250—300 до 100—50 мм). Важная операция — грохочение всей рудной массы для выделения классов крупности, предназначенных для обогащения. Обычно выделяется от 1 до 3—4 таких классов. Их нижняя граница в зависимости от применяемых методов находится в пределах от 50—25 мм до 10—3 мм.

В большинстве случаев грохочение сопровождается промывкой руды. В связи с этим в схему дополнительно включают операции классификации и сгущения. Иногда они совмещаются с соответствующими операциями подготовки сырья для гравитационного, флотационного и других методов переработки полезных ископаемых.

Сортируемые классы подвергают облучению и сепарации с разделением на концентрат и хвосты. Сепарацию минерального сырья можно также проводить для его разделения на продукты, отличающиеся вещественным составом, которые затем должны перерабатываться другими методами обогащения или металлургическими методами.

В целом можно выделить следующие основные узлы рассматриваемой схемы: 1) предварительная подготовка сырья

к обогащению (разделение по сортам, шихтовка и т. п.); 2) основная подготовка сырья к сепарации (дробление, грохочение, промывка, подача материала на облучение); 3) основные операции (облучение, сепарация); 4) вспомогательные операции (классификация, сгущение и др.).

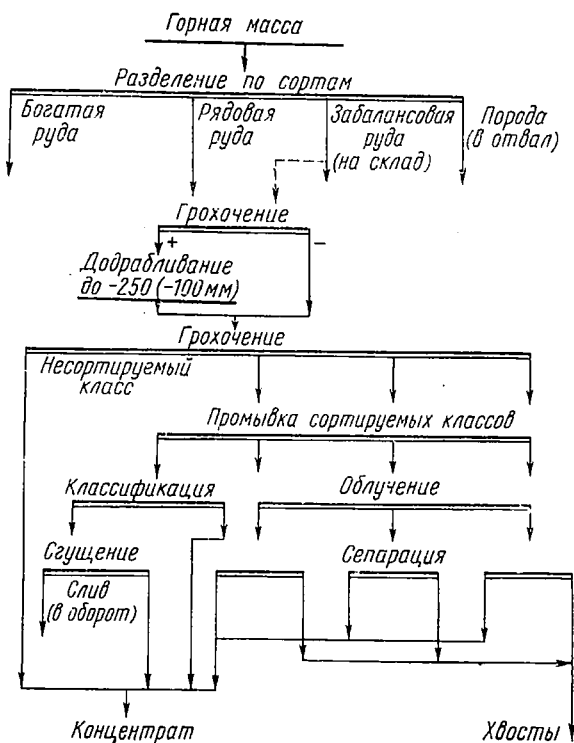


Рис. 3.1. Принципиальная схема переработки руд ядернофизическими методами.

Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с осуществлением подготовительных операций. Отметим, что здесь сознательно не рассматриваются принцип действия, типы и технические характеристики дробилок, грохотов, промывочных машин, классификаторов и т. п., используемых на подготовительных и вспомогательных операциях и при других методах обогащения и подробно описанных в литературе [2, 71, 81].

При сепарации сырья ядернофизическими методами перерабатываются относительно крупные куски (крупные, средние и мелкие классы крупности). В связи с этим при подготовке сырья для сепарации обычно используют только крупное (до 100—350 мм) и значительно реже среднее дробление (до 40—100 мм). Необходимость дробления сырья перед сепарацией в основном

обусловливается техническими неудобствами переработки чрезмерно больших кусков руды и недостаточной проникающей способностью излучений. Первый фактор ограничивает верхнюю границу сортируемых классов в пределах от 200 до 300 мм. Сепарация более крупных кусков предполагает необходимость разработки громоздкого сортировочного оборудования на относительно небольшое количество сверхкрупных классов, что иногда нецелесообразно. В зависимости от второго фактора максимальная крупность сортируемых классов может меняться в широких пределах: от 300—150 мм (при обогащении руд с использованием жесткого γ -излучения) до 100—50 мм (при сепарации сырья, облученного тепловыми нейтронами) и даже до 50—25 мм в процессах, где разделение осуществляется по интенсивности β -излучения кусков руды.

Для последующей технологии сепарации руд рассматриваемыми методами важно учитывать, что в процессах крупного и среднего дробления изменяется не только гранулометрический состав сырья, но в отдельных случаях даже контрастность и вещественный состав сортируемых классов. Соответственно этому следует ожидать и изменения технологических показателей переработки дробленной руды, в частности, таких, как выход продуктов сепарации и их качество, эффективность процесса разделения и т. п. Внимательное отношение к определению верхней границы машинных классов в каждом конкретном случае позволит избежать ошибок в оценке требуемой степени дробления исходной руды. Недостаточная степень дробления приводит к уменьшению эффективности сепарации в результате неполного раскрытия полезного минерала и малой проникающей способности или самопоглощения излучения. Переизмельчение исходного материала также приводит к ухудшению результатов сепарации вследствие увеличения доли несортируемых классов крупности. В каждом конкретном случае необходимо проводить специальные исследования и с учетом их результатов и технико-экономических расчетов определять рациональную степень дробления исходного сырья, предназначенного для переработки тем или иным методом.

Грохочение сырья перед сортировкой вызывается не только необходимостью отделения мелких (несортируемых) классов крупности, но и целесообразностью выделения нескольких достаточно узких классов крупности. Это один из путей снижения отрицательного влияния «эффекта массы» на результаты обогащения.

При грохочении обычно выделяется от двух до шести классов крупности, самый мелкий из которых не подвергается облучению и сепарации. В ряде случаев, когда руда достаточно крепкая, процесс грохочения может быть сухим. Однако во многих случаях требуется промывка выделенных классов крупности. Ее необходимость в первую очередь обусловлена технологическими

причинами. Рудная мелочь, часто обогащенная полезным компонентом, налипает на куски руды, и это может существенно исказить результаты сортировки, так как вероятность отбора таких кусков в концентрат значительно увеличивается. Одновременно рудная мелочь загрязняет оборудование, что увеличивает уровень фона. Применение промывки исходной руды или, что проще, только сортируемых классов позволяет резко снизить отрицательное влияние упомянутых выше эффектов. Кроме того, промывка улучшает условия труда при сепарации сырья в результате уменьшения (или полного устранения) пыли в производственных помещениях.

Важнейший процесс подготовки сырья для облучения и сепарации — подача сырья на облучение. Для этого используют различные питатели и устройства, позволяющие преобразовать поток рудного материала в форму, удобную для облучения и последующей сепарации. В зависимости от технологических свойств сырья и задач, поставленных перед сортировкой, руду подают на облучение в виде потока отдельных кусков или порций, а также в виде непрерывного потока.

В целом подготовительные процессы — важный этап в общей схеме переработки сырья, так как они во многом определяют эффективность переработки сырья ядернофизическими методами. В связи с этим все подготовительные операции и их режим должны быть непосредственно увязаны с задачами по переработке конкретного типа сырья и учитывать специфические требования процессов облучения и сепарации.

2. ВЛИЯНИЕ ГРОХОЧЕНИЯ НА РАВНОМЕРНОСТЬ МАССЫ КУСКОВ В СОРТИРУЕМЫХ КЛАССАХ КРУПНОСТИ

Неравномерность в размерах и соответственно в массе кусков, наблюдающаяся при сортировке отдельных классов крупности, заметно снижает селективность процесса сепарации. Один из путей снижения влияния эффекта массы на результаты сепарации — применение процесса грохочения для выделения узких классов крупности достаточно однородных по размерам кусков.

Разделение рудной массы на грохоте — статистический процесс. На его эффективность оказывают влияние «живое» сечение, форма и размеры отверстий сита, крупность исходного материала, количество «трудных» зерен в нем, содержание влаги, форма кусков, производительность грохота, угол наклона, размеры рабочей поверхности грохота, кинематические условия движения материала на данном грохоте и др. [2, 71, 81]. Однако при выбранных условиях и конкретном типе сырья на эффективность грохочения основное влияние оказывают размеры отверстий сита и куска. Это особенно справедливо для условий выделения крупных и средних классов, когда процесс грохочения осуществляется при движении кусков по сетке практически в один слой.

При движении по сетке кусок может неоднократно располагаться по отношению к сетке различными сторонами (плоскостями), проекции которых на горизонтальную плоскость могут быть различны как по форме, так и по абсолютным размерам. В результате этого расположение куска относительно ячеек сетки грохота и прохождение его через отверстия сита есть явления случайные.

Как известно [26], при определенных условиях (при большом числе независимых испытаний в массовых процессах) к статистическим явлениям может быть применен нормальный закон распределения вероятностей. Вероятность единичного события при этом определяется по упрощенной формуле Ляпунова

$$P = f(R) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^R e^{-\frac{R^2}{2}} dR, \quad (3.1)$$

где R — так называемое «нормированное отклонение», являющееся аргументом функции вероятностей и определяющее вероятность появления отклонения от среднего размера* куска, большего, чем заранее заданная величина.

Значения функции $f(R)$ для различных значений R приводятся в работе [26] и др. В этом случае

$$R = (d_c - d) / \sqrt{d}, \quad (3.2)$$

где d_c — диаметр круглого отверстия сита, мм.

Переход от квадратных отверстий к эквивалентным им круглым можно проводить по эмпирической формуле, полученной на основе данных работы [71]:

$$d_{кр} = 0,832d_{кв}, \quad (3.3)$$

где $d_{кв}$ — размер стороны квадратного отверстия; $d_{кр}$ — диаметр круглого отверстия.

Пользуясь формулами (3.1) — (3.2) и имея характеристику сырья по средним размерам кусков, можно рассчитать вероятность их прохождения через отверстия сетки и определить выход кусков в подрешетный или надрешетный продукты. Однако эти формулы, позволяя изучать распределение кусков по классам крупности, не дают возможности определять их весовой выход, так как в выделяемых при грохочении классах отсутствует четкая зависимость между средним размером куска и его массой. Куски руды с одинаковым средним размером, но различной формы, а

Таблица 3.1

Зависимость коэффициента K_p от соотношения d/d_c

d/d_c	K_p	d/d_c	K_p
0,2	1,0	1,2	0,70
0,4	1,0	1,4	0,57
0,6	0,98	1,6	0,43
0,8	0,92	1,8	0,30
1,0	0,82	2,0	0,14

* Кусок может падать через отверстие сетки любой стороной, что равносильно мнимому изменению среднего размера куска.

соответственно и массы, распределяются при грохочении по различным классам крупности. В связи с этим на основе опытных данных были определены поправочные коэффициенты K_p к средним массам кусков по отдельным фракциям классов крупности (табл. 3.1).

С учетом сказанного весовой выход данной фракции в подрешетный продукт определяется по формуле:

$$q_{фр} = n_{фр} \bar{q} K_p, \quad (3.4)$$

где $n_{фр}$ — число кусков данной фракции, попавших в подрешетный продукт; \bar{q} — средняя масса кусков фракций (по данным характеристики крупности исходного сырья).

Результаты расчетов весовых выходов отдельных классов крупности, основанных на использовании формул (3.2), (3.4) и табл. 3.1, приведены в табл. 3.2. Из их анализа следует, что

Таблица 3.2

Сравнение расчетных и фактических выходов различных классов крупности

Класс крупности, мм	Выход классов, %		$\gamma_{ф}/\gamma_{р}$
	расчетный $\gamma_{р}$	фактический $\gamma_{ф}$	
Проба № 1 (класс — 50 + 10 мм, круглые отверстия)			
+40	45,6	41,2	0,90
-40+25	42,6	47,4	1,11
-25	11,8	10,4	0,88
Итого	100,0	100,0	
Проба № 2 (класс — 200 + 25 мм, квадратные отверстия)			
+100	33,4	33,9	1,01
-100+75	19,2	18,6	0,97
-75	47,4	47,5	1,00
Итого	100,0	100,0	

отклонения расчетных показателей от фактических находятся в основном в пределах $\pm 10\%$. Исследованные пробы состояли из кусков, средний коэффициент полноты которых изменялся от 0,43 до 0,65. Это позволило использовать описанную методику расчетов для анализа процесса грохочения и оценки его возможностей как одного из основных процессов подготовки сырья для облучения и сепарации.

Вероятностный характер прохождения кусков через отверстия сита предопределяет некоторые закономерности процесса грохочения. Так, если на основе расчетов по формулам (3.1), (3.2) построить график, где по оси ординат отложить вероятность прохождения куска через отверстия сита, а по оси абсцисс — средний диаметр куска, то получим кривую, изображен-

ную на рис. 3.2. Из графика следует, что на сетке с отверстиями 40 мм все куски со средним диаметром меньше 26 мм (интервал *A*) попадают в подрешетный продукт, а все куски крупнее 60 мм остаются в верхнем продукте (интервал *B*). Куски с размером от 26 до 60 мм (интервал *Б*) распределяются между под-

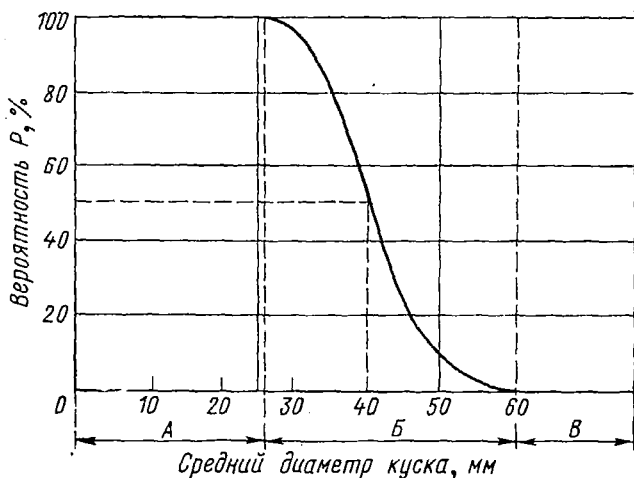


Рис. 3.2. Кривая разделения при грохочении руды.

решетным и надрешетным продуктами. Очевидно, куски, входящие в интервал *Б*, можно назвать «трудными» кусками для данного сита, а интервал *Б* определяет селективность процесса грохочения.

Имеется возможность теоретически определять ширину интервала *Б*. Для этого решим выражение (3.2) относительно d , найдя корни квадратного уравнения. Разность значений этих корней определит интервал *Б*, который обозначим через Δ_d :

$$\Delta_d = R \sqrt{4d_c + R^2}. \quad (3.5)$$

Отсюда следует, что ширина интервала разделения, определяющая селективность процесса, зависит только от размера отверстия сетки и величины «нормированного отклонения». Для практических целей достаточно принимать значение $R=2$, соответствующее надежности, равной 95,4.

При $R=2$ формула (3.5) принимает вид

$$\Delta_d = 4 \sqrt{d_c + 1} \quad (3.6)$$

или при $d_c \geq 10$ с погрешностью менее 5%

$$\Delta_d \approx 4 \sqrt{d_c}. \quad (3.7)$$

Для оценки возможностей процесса грохочения брали три условных типа руд с различными гранулометрическими характеристиками (табл. 3.3). Цель исследований — найти критерии для оценки модуля шкалы грохочения, обеспечивающего наименьший разброс параметров кусков выделяемых классов крупности. Нижней границей исследуемых классов приняли 25 мм. Отношение диаметров отверстий верхнего и нижнего сит ($d_n/d_{н} = \psi$) изменялось от 1,04 до 3,0. Степень однородности кусков в классе по их размерам и массе определяли через коэффициент вариации соответствующего признака (табл. 3.4). При расчетах установили, что характеристика выделяемых классов мало зависит от типа гранулометрического

Таблица 3.3
Гранулометрическая характеристика различных типов руд (выход классов, %)

Тип руды	Класс, мм			
	+75	-75+50	-50+25	-25
I	7,0	18,5	31,1	43,4
II	25,0	25,0	25,0	25,0
III	43,0	31,0	19,0	6,5

состава и определяется в основном отношением размеров ячеек верхней и нижней сеток. Наиболее важный признак — коэффициент вариации кусков по их массе (V_q) — остается практически постоянным при увеличении отношения ψ с 1,04 до 1,3—1,4 и начинает заметно увеличиваться лишь при значениях $\psi = 1,5—1,6$ и выше. Коэффициент вариации кусков по их среднему размеру (V_d) при отношении ψ в пределах от 1,1 до 1,5—1,6 практически остается постоянным (20—22%).

Таблица 3.4
Изменения коэффициентов вариации (%) среднего размера (V_d) и массы (V_q) кусков руды в зависимости от параметра ψ

Класс крупности, мм	ψ	V_d			V_q		
		I	II	III	I	II	III
-26+25	1,04	14	13	13	32	38	38
-27+25	1,08	17	17	17	34	39	39
-28+25	1,12	20	20	20	38	39	37
-29+25	1,16	20	20	20	37	38	38
-30+25	1,20	20	20	20	37	38	37
-32+25	1,28	20	20	20	39	38	38
-34+25	1,36	20	20	20	40	40	39
-36+25	1,44	21	21	21	42	43	41
-38+25	1,52	21	21	21	44	44	42
-40+25	1,60	22	22	21	46	46	44
-45+25	1,80	23	23	22	51	51	48
-50+25	2,00	25	25	24	57	56	51
-60+25	2,40	28	28	26	67	64	58
-75+25	3,00	32	34	28	80	73	64

Таким образом, грохочение позволяет лишь частично уменьшать разброс в массе сортируемых кусков, хотя и это положительно сказывается на результатах сепарации. Однако полностью решить проблему выделения однородных по массе кусков руды с помощью грохочения принципиально невозможно. На основе полученных материалов можно сделать вывод: для обеспечения максимально возможной однородности кусков по их массе модуль шкалы грохочения должен быть в пределах от 1,3—1,4 до 1,5—1,6. В связи с этим можно считать, что при сортировке руды крупностью от 200 до 10 мм ее необходимо разделять на 4—6 классов. Это положение справедливо, если в процессе сепарации не учитывается масса или толщина кусков.

Рассмотренный подход к оценке модуля шкалы грохочения (на основе учета только неоднородности кусков по их массе) нельзя абсолютизировать, так как величина модуля определяется не только степенью неоднородности кусков по их массе или другому параметру, но и контрастностью перерабатываемого сырья и некоторыми другими факторами. Чем выше степень контрастности, тем на меньшее число классов можно разделять руды перед сепарацией [50].

3. ОБЛУЧЕНИЕ СЫРЬЯ

Процесс облучения — один из важнейших в общей последовательности операций при переработке сырья ядернофизическими методами. Качество облучения во многом определяет чувствительность и эффективность выбранного метода сепарации. В связи с этим к процессу облучения предъявляются довольно жесткие требования по стабильности во времени характеристик пучка первичного излучения; постоянству геометрических условий облучения кусков руды; соблюдению одинаковой продолжительности облучения для всех кусков руды; равномерности облучения отдельных кусков (порций) сырья; соблюдению постоянства времени выдержки.

Нестабильность во времени характеристик пучка излучения может быть связана с распадом источника излучения или нестабильной работой самого источника излучения (ускорительные источники излучения). В первом случае нестабильность имеет закономерный характер, что позволяет при регистрации излучения учитывать распад источника, вводя соответствующие поправки. Во втором случае нестабильность работы источника может не иметь закономерного характера и ошибки, возникающие в связи с этим, не могут быть исправлены в дальнейшем. К таким источникам излучения должны предъявляться особо жесткие требования по надежности и стабильности их работы.

Определенные сложности возникают при обеспечении одинаковых геометрических условий облучения кусков руды. Здесь речь может идти о постоянстве лишь некоторых из этих условий,

и в первую очередь — о постоянстве траектории движения рудных кусков через пучок излучения. При малых скоростях движения кусков обычно удается создать такую траекторию, используя различные конструкции питателей и транспортирующих устройств. Однако проблема стабилизации траектории движения облучаемого материала, особенно при больших скоростях (более 1—2 м/сек), не всегда решается полностью. В таких случаях задача состоит в достижении определенного уровня в колебаниях траектории, которые не оказывали бы существенного влияния на конечные результаты сепарации.

Важное требование к процессу облучения связано с постоянством времени облучения. Некоторые теоретические вопросы влияния продолжительности облучения на число возникающих вторичных частиц (квантов) были рассмотрены в разд. 3 гл. 1. Здесь остановимся на влиянии длительности облучения и других факторов на количество частиц, падающих на образец.

Рассмотрим однородный по плотности пучок частиц, ширина которого равна $l_{\text{п}}$, а высота $h_{\text{п}}$. Пусть через пучок со скоростью v перемещается образец, каждая точка которого проходит через пучок расстояние, равное $l_{\text{п}}$. Поэтому продолжительность облучения t_0 каждой такой точки составит

$$t_0 = l_{\text{п}}/v. \quad (3.8)$$

Количество частиц W , падающих на образец за время облучения, пропорционально плотности потока частиц I_0 , площади облучаемого сечения $S_{\text{к}}$ куска и времени облучения t_0 , т. е.

$$W = I_0 S_{\text{к}} t_0. \quad (3.9)$$

Площадь облучаемого сечения куска можно представить как

$$S_{\text{к}} = 0,64ac, \quad (3.10)$$

где c и a — максимальные высота и длина кусков; 0,64 — средний коэффициент перехода к площади реального сечения куска (определен экспериментально). С учетом формулы (3.8)

$$W = I_0 S_{\text{к}} l_{\text{п}}/v. \quad (3.11)$$

При неоднородном по плотности пучке излучения расчеты числа частиц, падающих на кусок за время его облучения, значительно усложняются. В частности, они могут быть проведены методом численного интегрирования с использованием формулы

$$W = \frac{S_{\text{к}}}{v} \sum_{i=1}^{i=n} I_i l_{\text{п}i}, \quad (3.12)$$

где $l_{\text{п}i}$ — элементарный участок пути куска через пучок ($\sum l_{\text{п}i} = l_{\text{п}}$); I_i — плотность потока частиц на участке $l_{\text{п}i}$.

Расчет проводится для узкой полосы в сечении пучка излучения, в пределах которой перемещается кусок руды. Общая площадь этой полосы определяется произведением $sl_{\text{п}}$.

Сырье можно облучать в покусковом, поточном и порционном режимах. В покусковом режиме куски руды поступают на облучение, находясь на определенном расстоянии друг от друга. При поточном — куски проходят через узел облучения в виде непрерывного потока, который может характеризоваться толщиной (высотой) и шириной. В каждый данный момент облучению подвергается какой-либо участок этого потока. Порционный режим облучения аналогичен покусковому, но облучению подвергаются не отдельные куски руды, а порции, состоящие из определенного количества кусков. Необходимость применения того или иного режима должна вытекать из задач и условий сепарации и свойств конкретного вида сырья.

Так как первичное и вторичное излучения обладают определенной проникающей способностью в веществе, то при поточном (и порционном) режиме облучения обычно задаются допустимой степенью неравномерности облучения рудного потока по его толщине x . Степень неравномерности можно характеризовать отношением потоков излучения Φ и Φ_0 :

$$\Phi/\Phi_0 = \exp(-\mu x). \quad (3.13)$$

В зависимости от условий и требований к результатам облучения нейтронами или γ -квантами показатель Φ/Φ_0 может быть в пределах от 0,75 до 0,95. Например, при облучении руд жесткими γ -квантами с энергией 6—12 Мэв работа с показателем Φ/Φ_0 в пределах от 0,80—0,85 позволяет облучать многослойный поток рудных частиц крупностью — 25+5 мм толщиной до 50—75 мм. Это значительно повышает производительность процесса облучения и одновременно обеспечивает достаточно низкий уровень погрешностей, обусловленных неравномерностью облучения отдельных кусков руды.

Оценка возможной производительности облучения (частоты следования кусков через пучок частиц) может быть произведена из следующих соображений. Время перемещения t куска на расстояние, равное своему размеру d , определяется по формуле

$$t = d/v. \quad (3.14)$$

Тогда максимальная частота следования кусков через пучок равна $1/t$. Отсюда

$$n = v/d, \quad (3.15)$$

где n — число кусков, проходящих в единицу времени через заданную точку пространства.

Следовательно, производительность процесса облучения определяется скоростью перемещения рудных образцов и их размерами. Сопоставляя формулы (3.8) и (3.15) и проводя преобра-

зования, получаем, что при постоянной скорости рудного потока через зону облучения частота следования кусков составит

$$n = l_n/t_0 d. \quad (3.16)$$

При заданной скорости движения образцов уравнение (3.16) связывает такие важные параметры облучения, как частоту следования кусков, ширину пучка, продолжительность облучения и размер кусков.

Если средняя масса кусков равна \bar{q} , а средний размер кусков \bar{d} , то

$$B = n\bar{q} = v\bar{q}/\bar{d} \quad (3.17)$$

и

$$B = l_n \bar{q}/t_0 \bar{d}, \quad (3.18)$$

где B — производительность процесса облучения (кг/сек, т/ч и т. п.).

Специфическое требование к процессу облучения при активационных методах обогащения заключается в том, что время облучения необходимо выбирать с учетом сохранения требуемого уровня искусственной радиоактивности рудных кусков в момент их прохождения через узел регистрации.

Как известно, активность полученного изотопа в момент времени t_n после окончания облучения при постоянных плотности потока, вещественном составе и массе кусков определяется произведением

$$[1 - \exp(-\lambda t_0)] \exp(-\lambda t_n). \quad (3.19)$$

Это обстоятельство дает возможность варьировать в широких пределах время облучения и выдержку для получения в момент регистрации заданного уровня активности рудных кусков. В практике используют различные соотношения параметров t_0 и t_n . При регистрации излучений короткоживущих изотопов для получения высокой чувствительности стремятся всемерно сокращать время выдержки. При сепарации руд по активности долгоживущих изотопов время выдержки иногда сознательно увеличивают, чтобы достичь практически полного распада короткоживущих мешающих изотопов. Подобный случай отмечается, например, при обогащении марганцевых руд нейтронно-активационным методом [87].

4. РЕЖИМЫ СЕПАРАЦИИ

Обычно выделяют три режима сепарации: покусковой, порционный и поточный [33, 34, 50, 62]. При покусковом режиме сепарации куски руды перемещаются через узлы регистрации и разделения по одному, находясь на некотором расстоянии друг от друга. Порционный режим аналогичен покусковому, отлича-

ется тем, что вместо кусков через сепаратор проходят отдельные порции руды, каждая состоит из некоторого числа кусков. При поточном режиме сепарации рудная масса проходит через узел регистрации в виде непрерывного потока, из которого с помощью радиометра и разделяющего устройства выделяются отдельные порции, направляемые в концентрат или хвосты.

Максимально возможные технологические показатели покускового режима сепарации независимо от применяемого метода сортировки принципиально определяются степенью контрастности перерабатываемого материала. Конкретно их можно определить, например, при помощи кривых контрастности. Теоретические показатели обогащения сырья тем или иным методом определяются кривыми обогатимости, соответствующими выбранному методу. В связи с этим определение максимально возможных (теоретических) технологических показателей покускового режима сепарации обычно не вызывает затруднений.

При порционном режиме сепарации технологические показатели зависят еще и от других факторов.

Отметим, что каждая порция, состоящая из k кусков, может включать в себя куски руды с различным содержанием полезного компонента. Согласно теории вероятностей, при случайном отборе и достаточно большом числе кусков в порции ($k \rightarrow \infty$) вероятность появления в ней кусков с различным содержанием полезного компонента будет примерно равна частоте нахождения таких кусков в сортируемом классе. Каждая такая порция достаточно полно характеризует весь класс крупности. Поэтому практически они не должны отличаться друг от друга, например, по содержанию полезного компонента. Сепарация сырья, разделенного на такие большие порции, невозможна. Наоборот, при малом числе кусков в порции ($k \geq 1$) нельзя заранее точно предсказать, из каких кусков будет состоять данная конкретная порция руды, а содержание полезного компонента в ней может оказаться любым в пределах от нуля до некоторого максимального значения, характерного для каждого вида сырья.

Рассмотрим простейший случай. Пусть сырье состоит из двух фракций. Количество кусков в рудной фракции n , в безрудной m . При этом $n + m = H$.

Выход хвостов (безрудной фракции) составит

$$\gamma_x = m/H, \quad (3.20)$$

а выход концентрата (рудная фракция)

$$\gamma_p = n/H. \quad (3.21)$$

Вероятность образования порций, содержащих только безрудные куски, определяется по формуле [26]

$$P_x = C_m^k / C_H^k, \quad (3.22)$$

где k — число кусков в порции; C_m^k и C_H^k — число сочетаний соответственно из m по k и из H по k .

Известно, что

$$\frac{C_m^k}{C_H^k} = \frac{m! (H-k)!}{H! (m-k)!}$$

После преобразований имеем

$$\frac{C_m^k}{C_H^k} = \frac{m}{H} \cdot \frac{m-1}{H-1} \cdot \dots \cdot \frac{m-k+2}{H-k+2} \cdot \frac{m-k+1}{H-k+1}$$

При больших значениях m и H , т. е. когда имеем дело с большим количеством сырья, и малых k ($k \ll m$) можно принять, что

$$\frac{m}{H} \approx \frac{m-1}{H-1} \approx \dots \approx \frac{m-k+2}{H-k+2} \approx \frac{m-k+1}{H-k+1} \approx \gamma_x. \quad (3.23)$$

С учетом (3.23) $P_x \approx \gamma_x^k$. Заменяя γ_x на γ_1 и P_x на γ_k , получаем, что формула (3.22) преобразуется к виду

$$\gamma_k \approx \gamma_1^k, \quad (3.24)$$

где γ_1 — теоретический выход отвальных фракций при сепарации по одному куску; γ_k — теоретический выход хвостов при сортировке по k кусков в порции.

Анализ возможностей порционной сортировки на основании формулы (3.24) был проведен В. А. Мокроусовым и др. [50].

Изменения величины γ_k в зависимости от значений параметров γ_1 и k показаны в табл. 3.5.

Детальный анализ показывает, что выражение (3.24) не учитывает всех возможных сочетаний кусков, в частности некоторых порций, имеющих содержание компонента меньше граничного, и др. Чем меньше теоретический выход хвостов, тем больше погрешность в вычислениях по формуле (3.24). Кроме того, рассматриваемое выражение справедливо лишь для идеально перемешанного рудного сырья. Так как такой степени перемешивания практически достигнуть невозможно, то фактический выход хвостов при порционной сепарации $\gamma_{к.ф}$ всегда будет отличаться от выхода, определенного по формуле (3.24). Введем коэффициент, учитывающий отклонения фактических данных от расчетных:

$$\kappa = \gamma_{к.ф} / \gamma_k. \quad (3.25)$$

Если $\gamma_{к.ф} = \gamma_k$, то $\kappa = 1$, что справедливо для идеально перемешанной руды.

Таблица 3.5
Выход отвальных фракций при порционном режиме сепарации, доли ед.

γ_1 , доли ед.	Число кусков в порции		
	2	3	4
0,95	0,90	0,86	0,81
0,90	0,81	0,73	0,66
0,80	0,64	0,51	0,41
0,70	0,49	0,34	0,24
0,60	0,36	0,22	0,13
0,50	0,25	0,12	0,06
0,40	0,16	0,06	0,04

Если $\gamma_{к.ф} \neq \gamma_{к}$, то для предельной неравномерности распределения кусков с различным содержанием полезного компонента получим

$$\kappa_{м} = \gamma_{к.ф}/\gamma_{к} = \gamma_1/\gamma_1^k = 1/\gamma_1^{k-1}. \quad (3.26)$$

Так как $\gamma_1 < 1$, а k — целое положительное число, то всегда $\kappa \geq 1$. Таким образом, теоретические значения коэффициента находятся в пределах

$$1 \leq \kappa \leq 1/\gamma_1^{k-1}.$$

В действительности коэффициент κ не принимает максимальных значений, так как реальные руды не обладают предельной степенью неравномерности распределения полезного компонента (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Сравнение практических ($\kappa_{пр}$) и максимальных ($\kappa_{м}$) значений коэффициентов

Класс крупности, мм	γ_1 , %	k	$\kappa_{м}$	$\kappa_{пр}$	$\frac{\kappa_{м}}{\kappa_{пр}}$	Число кусков в пробе, шт.
—50+20	76	2	1,32	1,15	1,15	748
		4	2,27	1,43	1,59	
—50+20	43	2	2,33	1,94	1,20	102
		4	12,50	7,06	1,77	
—40+25	94	2	1,06	1,01	1,05	614
		4	1,21	1,02	1,19	
		8	1,54	1,04	1,48	
—15+10	60	2	1,67	1,14	1,47	136
		4	4,65	1,40	3,32	

На рис. 3.3 показана зависимость коэффициента $\kappa_{м}$ (кривая 1) и практически полученных коэффициентов $\kappa_{пр}$ (кривые 2 и 3) от теоретического выхода отвальных фракций для различных руд. Кривые 2 показывают изменение коэффициента в лабораторных условиях, где достигнута высокая степень перемешивания сырья. Кривые 3 построены по материалам, полученным на производстве при отборе проб непосредственно с сепараторов, когда степень перемешивания руды весьма несовершенна. Сравнение кривых 2 и 3 (см. рис. 3.3) показывает, что в производственных условиях руды еще в значительной степени сохраняют природную неравномерность распределения оруденения и тем самым способствуют получению более высоких показателей сепарации, чем это следует из формулы (3.24). В целом можно считать, что кривые 2 в основном определяют поправку к формуле (3.24), обусловленную ее математической неточностью, а кривые 3 определяют суммарное влияние погрешностей, связанных с неточностью формулы и несовершенством степени перемешивания горнорудной массы. Как следует из приведен-

ных материалов, поправка к формуле (3.24) не является постоянной. Значение ее определяется величинами γ_1 , k и степенью перемешивания кусков в сортируемом материале. Для практического использования формулу (3.24) преобразуют к виду

$$(\gamma_k)_{\text{пр}} = \kappa_{\text{пр}} \gamma_1^k. \quad (3.27)$$

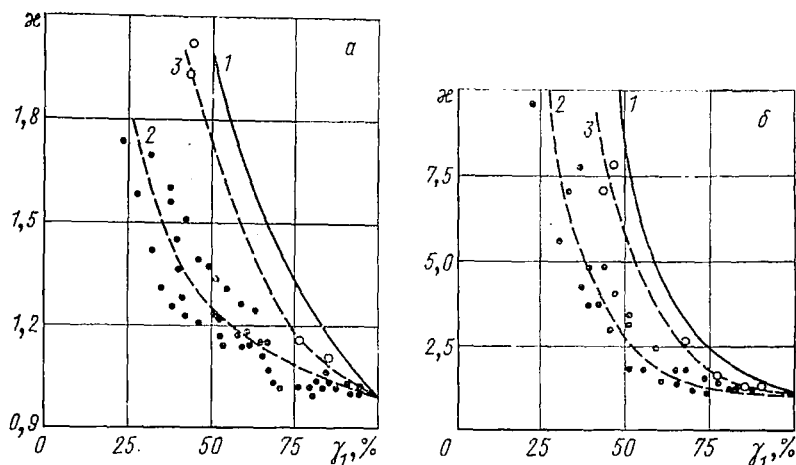


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента κ от теоретического выхода отвалных фракций:

a — в порции 2 куски; *b* — в порции 4 куски.

Поскольку степень перемешивания в различных точках технологического процесса даже на рудах одного месторождения неодинакова, то коэффициент $\kappa_{\text{пр}}$ может иметь постоянное значение лишь в определенных конкретных условиях. В табл. 3.7 приведены значения $\kappa_{\text{пр}}$, встречающиеся в производственных условиях. Анализ этих коэффициентов подтверждает, что технологические показатели реальных руд могут значительно превы-

Таблица 3.7

Осредненные значения коэффициента $\kappa_{\text{пр}}$ (при числе кусков в порции 2, 3 и 4)

γ_1 , доли ед.	2		3		4	
	Пределы колебаний	Среднее	Пределы колебаний	Среднее	Пределы колебаний	Среднее
0,95	1,0—1,05	1,02	1,0—1,08	1,08	1,0—1,1	1,05
0,90	1,02—1,08	1,04	1,04—1,15	1,10	1,1—1,3	1,20
0,80	1,06—1,15	1,10	1,1—1,25	1,18	1,2—1,4	1,32
0,70	1,1—1,3	1,20	1,2—1,6	1,40	1,3—2,0	1,65
0,60	1,2—1,5	1,35	1,4—2,5	1,72	1,7—3,5	2,35
0,50	1,3—1,9	1,60	2,0—4,0	2,32	2,8—6,0	3,88

шать расчетные данные. Это обстоятельство значительно расширяет область применения порционного режима. Так, если считать целесообразным сепарацию руд с выходом хвостов не менее 40—50% от сортируемых классов, то в порционном режиме при числе кусков в порции 2, 3 и 4 можно обогащать руды с теоретическим выходом отвальных фракций соответственно более 50—60, 60—70 и 70—80%. Однако следует помнить, что при наличии возможностей (достаточная чувствительность сепараторов и т. п.) по кусковой режим технологически всегда выгоднее порционного, так как теоретический выход хвостов при кусковом процессе на величину $1/\gamma_1^{k-1}$ выше соответствующих показателей порционной сортировки.

Определенные технологические особенности имеет и поточный режим сепарации. В данном случае идет речь о поточном режиме, при котором нагрузка руды на единицы длины транспортирующего устройства сепаратора небольшая. Предполагается, что по высоте потока куски руды располагаются, как правило, в один слой, а по ширине поток вмещает от 1 до 3—4 кусков данного класса. Поточный режим в определенной мере близок к порционному, так как в обоих случаях разделение руды на продукты обогащения осуществляется порциями. При порционном процессе масса порции задается дозирующим устройством еще до регистрации их излучения, при поточном — определяется плотностью потока излучения различных участков рудной массы и настройкой радиометра. При этом распределение руды по «порциям» будет иным, чем при порционном режиме обогащения. Часть порций, направляемых при порционном режиме в концентрат, при поточном процессе будет разделена на концентрат и хвосты, что в принципе должно приводить к повышению эффективности сепарации. Однако при поточном процессе в большей степени сказывается влияние эффекта подсвечивания, так как рудная масса на транспортирующем устройстве сепаратора располагается непрерывно. В связи с изложенным закономерности порционного режима в определенной мере могут быть распространены и на поточный режим обогащения.

Сравним условия сортировки в рассматриваемых режимах при их одинаковых производительностях, которые для поточного (B_1) и порционного (B_2) режимов можно определить по формулам:

$$B_1 = \varphi v_1, \quad (3.28)$$

$$B_2 = \frac{q_n}{l_1 + l_2} v_2 = \frac{q_n}{l} v_2, \quad (3.29)$$

где φ — масса руды, приходящейся на 1 пог. см несущего элемента сепаратора, г/см; v_1, v_2 — скорости движения несущих элементов сепараторов при поточном и порционном режимах, см/сек; q_n — средняя масса порции, г; l_1 — средняя длина уча-

стка несущего элемента, занятая одной порцией, см; l_2 — среднее расстояние между двумя соседними порциями, см; l — расстояние между центрами двух соседних порций, см ($l = l_1 + l_2$).

Если $B_1 = B_2$, то

$$\varphi v_1 = \frac{q_{\text{п}}}{l_1 + l_2} v_2 = \frac{q_{\text{п}}}{l} v_2.$$

При $v_1 = v_2$

$$\varphi = \frac{q_{\text{п}}}{l_1 + l_2} = \frac{q_{\text{п}}}{l}. \quad (3.30)$$

Равенство (3.30) определяет условия, при которых производительности обоих режимов равны. Заметим, что при порционном режиме плотность распределения руды по длине несущего элемента сепаратора неравномерна. Фактически участки l_2 не несут рудной массы, а вся руда сосредоточена на участках l_1 . В результате этого при одинаковой производительности плотность фактической загрузки участков несущих элементов, занятых рудным материалом, при порционном ($\varphi_{\text{пор}}$) и поточном ($\varphi_{\text{пот}}$) режимах будет различной. Соотношение ($\varphi_{\text{пор}}/\varphi_{\text{пот}}$) будет изменяться в зависимости от величины l_1/l . На практике величина l_1/l обычно составляет 0,6—0,9, что соответствует изменению соотношения $\varphi_{\text{пор}}/\varphi_{\text{пот}}$ от 1,6 до 1,1. Таким образом, при одинаковых производительностях фактическая плотность нагрузки при порционном режиме в 1,1—1,6 раза превышает плотность нагрузки в поточном режиме или, что равносильно, число кусков в порциях при порционном процессе для достижения производительности поточного процесса должно быть на 10—60% больше, чем в средней порции, выделяемой при поточном режиме. Следовательно, при сепарации одной и той же руды с одинаковой производительностью показатели обогащения поточного процесса должны быть выше соответствующих показателей порционного режима.

При идеальных условиях обогащения (высокая чувствительность, низкий уровень фона, отсутствие подсветки и т. п.) отношение теоретического выхода отвальных фракций приблизительно будет определяться формулой

$$\gamma_{\text{пот}}/\gamma_{\text{пор}} \approx 1/\gamma_1^k, \quad (3.31)$$

где $\gamma_{\text{пот}}$ — теоретический выход хвостов поточного режима при k кусках в средней порции, доли ед.; $\gamma_{\text{пор}}$ — теоретический выход хвостов порционного режима при $k+k_1$ кусках в порции, доли ед.; k_1 — разница в числе кусков в порциях при одинаковой производительности обоих режимов обогащения; γ_1 — теоретический выход хвостов при покусковом процессе, доли ед. (содержание полезного компонента в хвостах во всех трех случаях одинаково).

Формула (3.31) так же, как ранее формула (3.24), действительна для условий идеально перемешанной рудной массы. Из равенства (3.31) вытекает, что показатели обогащения поточного режима будут тем выше по сравнению с порционным, чем меньше теоретический выход отвальных фракций из сортируемого класса. Из изложенного следует также, что при условии сохранения одинаковых показателей сепарации при обоих режимах производительность поточного режима может быть существенно большей (в 1,1—1,6 раза), чем производительность порционного режима.

Вопрос о применении того или иного режима сепарации в конкретных условиях должен решаться на основе соответствующих технико-экономических расчетов. Технологически наиболее выгоден покусковой режим сепарации, при котором в большей мере могут быть использованы (при соответствующих условиях) технологические возможности, обусловленные природными характеристиками сырья (контрастность и т. п.). Однако в некоторых случаях (из-за недостаточной чувствительности аппаратуры, необходимости повышения производительности процесса и т. п.) целесообразно использовать поточный или порционный режимы. При этом первый режим более предпочтителен. Область применения поточного и порционного режимов, как правило, ограничена наиболее контрастными рудами с теоретическим выходом хвостов более 50—70% от сортируемых классов.

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИИ РУД

Вопросы определения экономической эффективности ядерно-физических методов сепарации разработаны слабо. Имеется всего несколько примеров, где дается экономическая оценка внедрения новых, в основном абсорбционных, методов сепарации сырья [4, 44] без подробного описания методики расчетов. Более полно эти вопросы разработаны в применении к радиометрическим методам обогащения урановых руд [3, 47, 50, 62]. Многие положения этих работ с учетом общих методик [48] могут быть использованы и при оценке экономической эффективности ядерно-физических методов обогащения полезных ископаемых.

В частности, такую оценку можно провести с учетом следующих принципиальных положений [3, 47]. Техничко-экономические показатели сравнивают по двум вариантам технологических схем: без применения и с применением ядерно-физических методов сепарации (соответственно схемы I и II). Общие затраты на добычу и переработку 1 т руды по схемам I и II составляют

$$A_1 = a_p + a_t + a_{II}; \quad (3.32)$$

$$A_2 = a_p + a_{II} + \gamma(a_t + a_{II}), \quad (3.33)$$

где A_1 и A_2 — затраты на 1 т руды при переработке соответственно без применения (схема I) и с применением (схема II) ядернофизических методов сепарации, руб/т; a_p — стоимость руды, руб/т; a_t — стоимость транспортных перевозок, руб/т; a_n — стоимость сепарации руды ядернофизическими методами, руб/т; a_n' — стоимость переработки руды другими методами (обогащительными, металлургическими и пр.), руб/т; γ — выход обогащенной руды (концентрата), доли ед.

Количество ценного компонента D , получаемого из 1 т исходного сырья по схемам I и II, определяют по формулам

$$D_1 = \alpha \epsilon_n; \quad (3.34)$$

$$D_2 = \alpha \epsilon_n \epsilon_n', \quad (3.35)$$

где α — содержание ценного компонента в исходной руде, кг/т; ϵ_n — извлечение (выход) ценного компонента в продукт, обогащенный ядернофизическими методами, доли ед.; ϵ_n , ϵ_n' — извлечение ценного компонента из исходной и обогащенной руды, доли ед.

Об эффективности каждой из двух схем, очевидно, можно судить по разности между стоимостью получаемого ценного компонента и общими затратами на переработку руды, т. е.

$$P_1 = D_1 C - A_1 = \alpha \epsilon_n C - (a_p + a_t + a_n); \quad (3.36)$$

$$P_2 = D_2 C - A_2 = \alpha \epsilon_n \epsilon_n' C - [a_p + \gamma (a_t + a_n) + a_n], \quad (3.37)$$

где C — отпускная цена за 1 кг полезного компонента, руб/кг; P_1 , P_2 — прибыли, получаемые по схемам I и II, руб/т. Тогда экономический эффект ΔP от внедрения ядернофизических методов сепарации полезных ископаемых определяется уравнением

$$\Delta P = P_2 - P_1 = (a_t + a_n) (1 - \gamma) - \alpha C (\epsilon_n - \epsilon_n - \epsilon_n') - a_n. \quad (3.38)$$

Как следует из уравнения (3.38), прибыль является довольно сложной функцией таких параметров, как выход концентрата, стоимость переработки руды ядернофизическими и другими методами, транспортные расходы, содержание полезного компонента в руде и его извлечение по сравниваемым схемам. В общем случае прибыль оказывается тем выше, чем больше выход хвостов и меньше потери ценного компонента при ядернофизических методах обогащения.

Более подробные расчеты по оценке экономической эффективности различных методов сепарации сырья, в том числе с оценкой влияния капитальных затрат, могут быть проведены с учетом материалов работ [3, 47, 48, 50, 62].

**ВОПРОСЫ
РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

К основным источникам ионизирующих излучений, создающих радиационную опасность при ядернофизических методах сепарации полезных ископаемых, относятся: 1) искусственные препараты, используемые как источники нейтронов, γ -квантов, β -частиц и др.; 2) облучательные установки (ядерные реакторы, нейтронные размножители, ускорители заряженных частиц); 3) рудная масса, обладающая искусственной или естественной радиоактивностью; 4) пыль активированной рудной массы.

Нормам радиационной безопасности (НРБ—69) для каждой группы критических органов установлены предельно допустимые соматические дозы внешнего и внутреннего облучения персонала. В частности, предельно допустимая доза (ПДД) облучения всего организма, гонад или красного костного мозга отдельного лица из персонала, непосредственно работающего с источниками ионизирующего излучения, установлена равной 5 бэр в течение одного года. Для сравнения различных видов ионизирующих излучений по ожидаемому биологическому эффекту рекомендовано использовать коэффициент качества KK . Числовые значения коэффициента, которые следует применять при расчете эквивалентной дозы смешанного ионизирующего излучения, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Коэффициенты качества KK различных видов ионизирующих излучений при хроническом облучении всего тела

Вид излучения	KK	Вид излучения	KK
γ -Излучение	1	Нейтроны с энергией $< 5 \text{ кэв}$	2,5
Рентгеновское излучение	1	» » 5 кэв	5
Электроны и позитроны	1	» » 100 кэв	8
β -Излучение	1	» » 500 кэв	10
α -Излучение ($E \leq 10 \text{ Мэв}$)	10	» » 1 Мэв	10,5
Протоны ($E \leq 10 \text{ Мэв}$)	10	» » 5 Мэв	7
Нейтроны тепловые	3	» » 10 Мэв	6,5

Одновременно НРБ-69 установлены предельно допустимое содержание ПДС радиоактивных изотопов в организме и годовое предельно допустимое поступление ПДП этих изотопов в организм, среднегодовые допустимые концентрации СДК радиоактивных изотопов в воздухе рабочих помещений, а также предельно допустимая на рабочем месте активность радиоизотопных источников, не требующая регистрации или получения разрешения санитарной службы.

В соответствии с «Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» (ОСП—72) комплекс мероприятий при работе с источниками ионизирующих излучений должен учитывать все виды лучевого воздействия на персонал, отдельных лиц из населения и населения в целом и предусматривать защитные мероприятия, обеспечивающие снижение суммарной дозы от всех источников, создающих внешнее и внутреннее облучение, до уровней, не превышающих ПДД или пределы доз для соответствующих категорий лиц и критических органов.

При сортировке руды ядернофизическими методами основную радиационную опасность составляют: нейтроны, γ -кванты, β -частицы. В некоторых случаях рудная масса после облучения может сохранять в течение некоторого времени (от нескольких секунд до нескольких дней) искусственную радиоактивность, иногда довольно значительную. Большую опасность для здоровья обслуживающего персонала представляет радиоактивная рудная пыль. В процессе работы может возникать активация основного и вспомогательного оборудования. В каждом конкретном случае радиационную опасность обычно создают лишь некоторые из приведенных выше источников с определенным комплексом радиационных условий. Для таких комплексов в соответствии с НРБ—69 и ОСП—72 разрабатываются конкретные меры, обеспечивающие безопасные условия проведения работ.

К основным мероприятиям, позволяющим существенно снизить уровень облучения обслуживающего персонала, относятся защита от излучения источников, вторичного излучения, возникающего при взаимодействии первичного излучения с рудой, а также от излучения активированных руд. Важны мероприятия по защите основного и вспомогательного оборудования от активирования и т. д. Условия безопасной работы обслуживающего персонала определяются с учетом трех основных принципов защиты от излучения: защиты временем, расстоянием и установкой экранов (контейнеров, защитных стен и т. п.). Расчет защиты производится на основе справочных данных.

При наличии остаточной радиоактивности облучаемых руд нужна оценка ее опасности и в случае необходимости разработка условий безопасной работы в процессе их сортировки, складирования и дальнейшей переработки. В частности, необходимо предусматривать меры по уменьшению дозы излучения от близ-

ко расположенных рудных (концентратных) бункеров и ограничивать время пребывания обслуживающего персонала у работающих сепараторов.

Один из основных видов радиационной опасности при обогащении руд — радиоактивная рудная пыль. К важнейшим мероприятиям по уменьшению количества рудной пыли в производственных помещениях и ее удалению относятся сортировка промытой (влажной) руды, гидроуборка рабочих помещений и вентиляция.

Особое внимание необходимо уделять предотвращению возможной активации основного и вспомогательного оборудования, разработке способов дезактивирования этого оборудования и условий его дальнейшего использования.

Следует отметить, что обычно защита от первичного излучения (как более мощного) оказывается достаточной для защиты обслуживающего персонала от вторичного излучения, образующегося при взаимодействии персонала с кусками руды.

Рабочие помещения должны быть снабжены надежной сигнализацией положения источников излучения и уровня излучения, а входы в помещения следует блокировать с устройствами, фиксирующими положение источников или уровень излучения.

При необходимости фабрики должны быть оборудованы специальными камерами для перетаривания источников излучения из транспортировочных контейнеров в рабочие. Все рабочие помещения, расстановка оборудования, системы защиты, блокировки и сигнализации должны быть выполнены в соответствии с ОСП—72 и согласованы с санитарной службой.

Независимо от условий работы на установках, где проводятся работы по обогащению руд с использованием источников излучения, должен быть организован постоянный дозиметрический контроль как за общим уровнем излучения в рабочих помещениях, так и уровнем облучения обслуживающего персонала.

Дозиметрический контроль (измерение доз излучения) проводится при помощи специальной дозиметрической аппаратуры индивидуального или коллективного пользования (переносной или стационарной). Весь персонал, обслуживающий установки для обогащения руд, должен иметь во время работы индивидуальные дозиметры для контроля за уровнем получаемых доз излучения (γ -квантов, нейтронов, β -частиц и т. п.). Для измерения доз γ -излучения в основном применяют приборы ионизационного типа: ДК-0,2 (для измерения доз до 0,2 р), КИД-1 (до 2 р) и ДК-50 (до 50 р). Для индивидуального контроля часто используются также кассеты с фотопленками (дозиметр ИФК); степень почернения фотопленки, определяемая после проявления, зависит от уровня облучения. Для измерения доз нейтронного излучения выпускают индивидуальные дозиметры нейтронов [72].

Переносные дозиметры типа «Кура», РУП и др. [35, 72] можно использовать для дозиметрического контроля отдельных участков рабочих помещений, оборудования, при работах по перетариванию источников и т. п. Установки для обогащения руд с применением источников внешнего излучения должны оснащаться стационарными радиометрами для контроля за уровнем радиации в рабочих помещениях, камерах и т. п. Особенно необходимы такие приборы при работе с мощными источниками излучения: реакторами, нейтронными размножителями, генераторами нейтронов, ускорителями заряженных частиц. Для измерения уровня γ -излучения применяют радиометры типа СД-1М, УСИД-2 и др. [35, 72], которые снабжены специальными устройствами, срабатывающими при превышении заданного уровня излучения в помещении. Аналогично для измерения потоков тепловых или быстрых нейтронов можно использовать приборы типа РН-3 и др.

В некоторых случаях сортировочные установки должны снабжаться дозиметрическими приборами для контроля за чистотой рук, одежды и обуви (приборы типа «ТИСС»). Для определения уровня загрязненности радиоактивной пылью сортировочного оборудования в помещениях в определенных точках могут отбираться мазки с последующим их анализом в дозиметрической лаборатории.

Цели и задачи дозиметрического контроля определяются для каждого конкретного случая исходя из условий, характера работ, типа применяемых источников и вида облучаемых руд.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Наиболее сильные α -излучатели (по данным работы [72])

Изотоп	Период полураспада, годы	Энергия α -частиц, Мэв	Число α -частиц на 1 г изотопа
Ac ²²⁷ (+)	21,6	4,94—7,43	1,345 · 10 ¹¹
Ra ²²⁶ (+)	1620	4,77—7,68	1,84 · 10 ¹¹
Po ²⁰⁸	2,93	5,11	2,16 · 10 ¹³
Th ²²⁸ (+)	1,9	5,34—8,78	1,52 · 10 ¹⁴
Po ²¹⁰	138,3 дня	5,30	1,66 · 10 ¹⁴

Примечание. Символ (+) здесь и далее означает, что изотоп находится в равновесии с продуктами распада.

Таблица П.2

β -Излучатели (по данным работ [69, 72])

Изотоп	Период полураспада	Максимальная энергия β -частиц, Мэв
H ³	12,26 года	0,0176
Ru ¹⁰⁶	1 год	0,039
C ¹⁴	5568 лет	0,158
S ³⁵	87,1 дня	0,167
Pm ¹⁴⁷	2,6 года	0,223
Ca ⁴⁵	153 дня	0,256
Ce ¹⁴⁴	284,5 дня	0,30 (70%) - 0,17 (30%)
Tl ²⁰⁴	3,56 года	0,765
Sr ⁹⁰	28,4 года	0,61
Y ⁹⁰	2,68 дня	2,18

Таблица П.3

Основные γ -излучатели, используемые для приготовления источников γ -квантов [25, 69]

Изотоп	Период полураспада	Минимальная и максимальная энергии γ -квантов, Мэв	Число γ -квантов на 1 распад	γ -эквивалент изотопа, мг-экв Ra	γ -Постоянная,
					$\frac{r \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мюри}}$
Fe ⁵⁹	45 дней	0,191—1,289	1,025	0,74	6,25
Co ⁶⁰	5,25 года	1,17—1,33	2	1,57	13,2
Zn ⁶⁵	245 дней	0,51—1,12	0,485	0,34	2,83
Sb ¹²⁴	60,1 дня	0,603—2,088	1,893	1,18	9,92
Cs ¹³⁷	30 лет	0,661	0,92	0,42	3,55
Ce ¹⁴¹	32,5 дня	0,145	0,75	0,064	0,54
Tm ¹⁷⁰	127 дней	0,084	0,37	1,4 · 10 ⁻⁴	1,2 · 10 ⁻³
Hg ²⁰³	45,8 дня	0,279	0,87	0,17	1,41
Ra ²²⁶ (+)	1620 лет	0,184—2,416	1,181	1,13	9,36
Ra ²²⁸ (+)	6,7 года	0,087—2,62	3,037	1,628	13,689

Таблица П.4

Основные источники нейтронов на основе реакции
(α, n) [9].

Источник	Период полураспада	Удельный выход нейтронов, 10^4 нейтрон/(сек·кюри)	Максимальная энергия нейтронов, Мэв	Средняя энергия нейтронов, Мэв	γ -Постоянная, $\frac{p \cdot \text{см}^2}{\text{мюри} \cdot \text{ч}}$
Pu ²³⁹ + Be	$2,44 \cdot 10^4$ лет	2,3	11,0	5,0	1*
Po + Be	138,3 дня	2,5	11,3	5,0	10^{-3}
Pu ²³⁸ + Be	86,4 года	2,5	11,3	5,0	10^{-3*}
Am ²⁴¹ + Be	458 лет	2,7	11,5	5,0	1*
Cm ²⁴³ + Be	162 дня	4,4	12	—	10^{-3*}
Ra + Be	1620 лет	17	13	4,7	9,36
Ac + Be	21,6 года	26	13	4,7	2,5

* Очень мягкое γ -излучение.

Таблица П.5

Основные фотонейтронные источники [9, 18, 72]

γ -Излучатель	Период полураспада	Энергия γ -квантов, Мэв	Мишень	Средняя энергия нейтронов, Мэв	Удельный выход фотонейтронов, 10^4 нейтрон/(сек·X·кюри·г)
Sb ¹²⁴	60,1 дня	1,693	Be	0,024	19
Y ⁸⁸	105 дней	1,9; 2,8	Be	0,158	10
Y ⁸⁸	105 дней	1,9; 2,8	D ₂ O	0,31	0,3
Ra ²²⁶	6,7 года	1,8; 2,62	Be	0,827	3,5
Ra ²²⁶	6,7 года	1,8; 2,62	D ₂ O	0,197	9,5
Ra ²²⁶	1620 лет	2,42	D ₂ O	0,12	0,1

Таблица П.6

Характеристика некоторых изотопов, подвергающихся спонтанному делению [9]

Изотоп	Период полураспада, годы		Число делений на 1 г в 1 ч	Среднее число нейтронов на 1 деление
	α -распад	спонтанное деление		
Pu ²⁴⁰	6580	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^6$	2,26
Cm ²⁴⁴	18	$1,4 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^{10}$	2,82
Cf ²⁵²	2,2	82	$2,2 \cdot 10^{15}$	3,84

Характеристика некоторых ускорителей электронов [17, 36, 37]

Тип ускорителя	Энергия электронов, Мэв	Частота импульсов, гц	Мощность, кат		Ток		Интенсивность излучения, ρ (мин.ж)	Габариты, м	Масса ускорителя, т
			средняя	в импульсе	средний, мка	в импульсе, ма			
Элит-3	2,5	—	10	40 000	—	—	—	$\varnothing 1,0 \times 1,3$	0,8
У-12	4,0	1; 400	—	—	100	100	6 000	—	—
ЛУЭ-8-5В	8,0	31—500	5	3 500	—	—	—	$5,0 \times 0,7 \times$ $\times 1,75$	2,0
У-27	10,0	430	—	—	500	500	20 000	—	—
ЛУЭ-10-1	10,0	—	1	1 000	—	—	2 000	$2,75 \times 1,0 \times$ $\times 0,8$	2,0
Микротрон	10,0	—	—	—	50	—	2 000	—	—
ЛУЭ-13-9	13,0	—	9	11 000	—	—	—	$5,5 \times 1,5 \times$ $\times 2,35$	5,0
Б5М-25	10—25	—	—	—	—	—	40	—	2,5
СБ-25	25	—	—	—	—	—	1 600	—	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев А. И. и др. Ядернофизические константы для нейтронного активационного анализа. Справочник. М., Атомиздат, 1969.
2. Андреев С. Е. и др. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М., «Наука», 1968.
3. Андрияшин И. А. и др. О целесообразности проведения радиометрического обогащения урановых руд и выборе оптимального уровня разделения при обогащении.— «Атомная энергия», 1965, т. 19, вып. 1, с. 79—80.
4. Анипко В. Я. Автоматическая сепарация комплексных ртутно-сурьмяных руд.— В кн.: Элементы теории и техники автоматического управления. Фрунзе, «Илим», 1966, с. 74.
5. Анипко В. Я. и др. Автоматическая выборка штучного концентрата из свинцовых руд.— В кн.: Элементы теории автоматического управления и контроля. Фрунзе, «Илим», 1965, с. 51.
6. Анипко В. Я. и др. К вопросу об автоматической сепарации ртутной и сурьмяной руд.— «Изв. АН КиргССР. Сер. естеств. и техн. наук», 1962, т. 4, № 8, с. 135.
7. Анипко В. Я., Горошко В. Д. Экспериментальное исследование возможности снижения влияния размеров кусков при контроле сурьмяной руды γ -абсорбционным методом.— В кн.: Физические методы экспресс-анализа состава веществ. Фрунзе, «Илим», 1970, с. 74.
8. Архипов О. А. Применение ядерных излучений для обогащения полезных ископаемых.— «Бюл. науч.-техн. информ. Гос. геол. ком. СССР. Отд. науч.-техн. информ. ВИМС», 1963, № 1 (45), с. 86.
9. Бак М. А., Шиманская Н. С. Нейтронные источники. М., Атомиздат, 1969.
10. Барон Л. И. Кусковатость и методы ее измерения. М., Изд-во АН СССР, 1960.
11. Белаш Ф. Н. и др. О радиометрическом обогащении кусковатых железных руд.— В кн.: Научные труды Криворожского горнорудного института. Вып. 13, 1962, с. 208.

12. Белаш Ф. Н. и др. Новый метод обогащения кусковых железных руд.— В кн.: Научные труды Криворожского горнорудного института. Вып. 22, 1964, с. 322.
13. Богданкевич О. В., Николаев Ф. А. Работа с пучком тормозного излучения. М., Атомиздат, 1964.
14. Браун И. А. Применение радиоактивных изотопов для породоотборки и контроля зольности сланцев на обогатительных фабриках.— В кн.: Материалы Второй Ленинградской конференции по применению радиоактивных изотопов в угольной и горнорудной промышленности. Т. 3. Л.—М., 1961, с. 60.
15. Булкин Ю. М. и др. Нейтронный размножитель СО-1.— «Атомная энергия», 1966, т. 21, вып. 4, с. 321.
16. Бурмистенко Ю. Н. и др. Некоторые характеристики излучения линейного электронного ускорителя.— В кн.: Ускорители. Вып. 10. Атомиздат, 1968, с. 238.
17. Бальднер О. А. и др. Линейные ускорители. М., Атомиздат, 1969.
18. Власов Н. А. Нейтроны. Изд. 2. М., «Наука», 1971.
19. Горошко В. Д. Исследование ослабления интенсивности γ -лучей при прохождении через уголь.— «Изв. АН СССР. Metallургия и топливо», 1959, № 1, с. 120.
20. Горошко В. Д. Радиометрический сухой метод обогащения угля.— «Вестн. АН СССР», 1960, № 10, с. 64.
21. Горошко В. Д. О расширении возможности применения проникающих излучений для обогащения угля.— «Изв. АН СССР. Metallургия и топливо», 1960, № 4, с. 185.
22. Горошко В. Д. Радиометрическая опытно-промышленная установка для сухого обогащения угля.— В кн.: Материалы Второй Ленинградской конференции по применению радиоактивных изотопов в угольной и горнорудной промышленности. Т. 3, Л.—М., 1961, с. 110.
23. Горошко В. Д. Радиометрический сепаратор с компенсатором неравномерности кусков.— В кн.: Радиоизотопные методы автоматического контроля. Т. 1. Фрунзе, Изд-во АН КиргССР, 1963, с. 51.
24. Горошко В. Д. и др. Способ сепарации кусковых материалов. Авторское свидетельство № 169458.— «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1965, № 7.
25. Гусев Н. Г. и др. Радиоактивные изотопы как гамма-излучатели. М., Атомиздат, 1964.
26. Длин А. М. Математическая статистика в технике. М., «Советская наука», 1958.
27. Жаворонков В. Я. и др. К вопросу сортировки пород и руд, слабо отличающихся по обычным физическим свойствам.— «Цветные металлы», 1965, № 5, с. 18.
28. Жуковский Н. П., Петров А. С. Новые методы технологических расчетов в обогащении. М., «Недра», 1969.
29. Зайцев И. Ф. и др. Радиометрический сепаратор РС-24 для сухого обогащения крупных классов углей.— «Науч. тр. Укр. проектно-конструкт. и науч.-иссл. ин-т по обогащению и брикет. углей», № 7, 1963, с. 260.
30. Залата Л. Ф. Связь степени раскрытия минеральных зерен при дроблении с основными техно-петрографическими параметрами железистых пород Криворожского бассейна.— «Науч. тр. н.-и. горнорудного ин-та», № 5, Гостоптехиздат, 1962, с. 7.
31. Кирьянов Г. И. Генераторы нейтронов.— В кн.: Радиационная техника. Вып. 1. М., Атомиздат, 1967, с. 41.
32. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1962.
33. Ковда Г. А., Скриниченко М. Л. Некоторые вопросы радиометрического обогащения урановых руд.— В кн.: Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958. Доклады советских ученых. Т. 3. М., Госатомиздат, 1959.

34. Ковда Г. А. и др. Использование радиоактивных излучений для автоматической сортировки руд. Доклад № 455 на IV Международной конференции ООН по мирному использованию атомной энергии, представленный советской делегацией. Женева, 1971.
35. Козлов В. Ф., Трошкин Ю. С. Справочник по радиационной безопасности. М., Атомиздат, 1967.
36. Комар Е. Г. Ускорители заряженных частиц. М., Атомиздат, 1964.
37. Комар Е. Г. Использование ускорителей в медицине и народном хозяйстве.— «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 4, с. 426.
38. Кошелев И. В. Радиометрическая аппаратура для обогащения урановых руд. М., Госатомиздат, 1963.
39. Крейндин И. И., Маркова Р. А., Паска Л. М. Приборы для радиометрического обогащения руд. М., Атомиздат, 1972.
40. Лейпунская Д. И. Нейтронный активационный анализ в аналитических работах при поисках и разведке полезных ископаемых.— В кн.: Передовой научно-технический и производственный опыт, вып. 6, М., ГОСИНТИ, 1962.
41. Лейпунский О. И. Гамма-излучение атомного взрыва. М., Атомиздат, 1959.
42. Лилеев В. А. Изучение возможности использования характеристического гамма-излучения с энергией 0,48 Мэв для радиометрического обогащения борных руд.— В кн.: Новые методы исследования минерального сырья и отдельные вопросы его технологии и обогащения. Труды молодых исследователей ВИАМС'а. М., 1968, с. 206.
43. Лукьянов В. Б. Измерение и идентификация бета-радиоактивных препаратов. М., Госатомиздат, 1963.
44. Малахов Г. М. и др. Радиометрическое обогащение железных руд.— «Горный журнал», 1969, № 3, с. 59.
45. Малахов Г. М. и др. Определение основных параметров, влияющих на гамма-абсорбционный метод сортировки хромовых руд.— «Изв. вузов, Горный журнал», 1971, № 3, с. 13.
46. Малахов Г. М. и др. О возможности использования гамма-абсорбционного метода для сортировки и обогащения хромовой руды.— «Горный журнал», 1971, № 3, с. 67.
47. Мальцев Е. Д. Определение оптимального выхода обогащенной руды при радиометрическом обогащении урановых руд.— «Атомная энергия», 1960, т. 8, вып. 2, с. 121.
48. Методика определения экономической эффективности использования атомной энергии в народном хозяйстве. М., Госатомиздат, 1963.
49. Моделян Л. Д. и др. К вопросу автоматизации выборки мартеновских руд и пустых пород в потоке на железнорудных предприятиях.— «Сб. науч. статей. Н.-и. горнорудн. ин-т УССР», 1968, № 15, с. 149.
50. Мокроусов В. А., Гольбек Г. Р., Архипов О. А. Теоретические основы радиометрического обогащения радиоактивных руд. М., «Недра», 1968.
51. Мухин К. Н. Введение в ядерную физику. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1965.
52. Мудренко В. М. и др. О геологической направленности при разработке ядернофизических методов элементного анализа горных пород и руд.— В кн.: Труды ВНИИЯГГ. Вып. 5. М., «Недра», 1969, с. 323.
53. Недолюбов Ю. Е. и др. Исследование в динамическом режиме комбинированной радиометрической системы контроля руд цветных металлов при их сепарации.— «Изв. АН КиргССР», 1971, № 4, с. 20.
54. Невский Б. В. Комплексное использование урановых руд.— «Атомная энергия», 1959, т. 6, вып. 1, с. 5.
55. Нисневич М. Л. и др. Исследование области применения рентгеносепарации для обогащения щебня из карбонатных пород.— В кн.: Научная конференция вузов СССР с участием научно-исследовательских институтов по физике горных пород и процессов. Секц. «Радиоинтроскопия горных пород и массивов». М., 1969, с. 31.
56. Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. М., «Недра», 1965.

57. Остапов И. Т. и др. Применённые ядерных методов для автоматизации процесса сортировки руд золоторудных месторождений.— «Цветные металлы», 1964, № 8, с. 20.
58. Парлаг А. М. и др. Расчет выходов фотонейтронов из смесей с небольшими количествами бериллия, воды, лития, углерода, урана и тория.— «Атомная энергия», 1963, т. 15, вып. 2, с. 146.
59. Плаксин И. Н. Перспективы развития новых методов обогащения полезных ископаемых.— «Изв. АН СССР. Отд. техн. н. Metallургия и топливо», 1962, № 2.
60. Посик Л. К., Кошелев И. В., Бовин В. П. Радиометрический экспресс-анализ добытых руд. М., Атомиздат, 1960.
61. Прокопчик В. И. и др. Применение нейтронного активационного анализа для определения содержания флюорита в рудничных вагонетках.— «Атомная энергия», 1969, т. 27, № 2, с. 161.
62. Пухальский Л. Ч. Теория контрастности урановых руд. М., Госатомиздат, 1963.
- 62а. Пшонченко Ю. М. Обогащение карбонатного щебня методом рентгенопарации.— В кн.: Основные направления совершенствования техники и технологии производства нерудных строительных материалов. М., Стройиздат, 1970, с. 226.
63. Рудановский А. А. Применение метода наведенной активности для автоматизации породоотборки.— В кн.: Радиоактивные методы контроля и регулирования производственных процессов. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959, с. 135.
64. Рудановский А. А. Радиоактивные изотопы в горном деле и обогащении полезных ископаемых. М., Атомиздат, 1965.
65. Сегалин В. Г. К вопросу о применении проникающих излучений для автоматизации процессов обогащения угля.— В кн.: Радиоактивные методы контроля и регулирования производственных процессов. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959, с. 147.
66. Сегалин В. Г. Новые возможности применения радиоактивных излучений для приборостроения и автоматики в горном деле и угольной промышленности.— В кн.: Материалы Второй Ленинградской конференции по применению радиоактивных изотопов в угольной и горнорудной промышленности. Т. 3. Л.— М., 1961, с. 32.
67. Синицын В. И. Исследование эффективности некоторых детекторов медленных нейтронов и γ -квантов.— «Изотопы в СССР», 1969, № 13, с. 14.
68. Скриниченко М. Л. и др. Электронные методы обогащения руд.— Сб. «IX Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых». Ч. 3. 1—6. 1970, Прага.
69. Справочник по ядерной физике. Под ред. Л. А. Арцимовича. М., Физматгиз, 1963.
70. Старцев Ю. С. и др. К вопросу активационного опробования апатитовой руды в транспортных емкостях.— В кн.: Геофизические поиски рудных месторождений. Ядерная геофизика. Т. 2, Алма-Ата, 1971, с. 31.
71. Таггарт А. Ф. Справочник по обогащению полезных ископаемых. Т. II, IV. М., Металлургиздат, 1950.
72. Филиппов Е. М. Прикладная ядерная геофизика. М., Изд-во АН СССР, 1962.
73. Филиппов Е. М. К вопросу о ядерно-геофизических методах определения состава горных пород и руд.— В кн.: Полевые ядерные геофизические методы. Под ред. В. И. Баранова. М., «Наука», 1966, с. 5.
74. Филиппов Е. М. Коэффициенты ослабления гамма-излучения некоторых горных пород и минералов.— Там же, с. 152.
75. Хан Г. А. Опробование, контроль и автоматизация процессов обогащения. М., Metallургиздат, 1958.
76. Шестаков В. В. Расчет установки для фотонейтронного экспресс-анализа бериллиевых руд в транспортных емкостях.— В кн.: Вопросы методики опробования месторождений полезных ископаемых при разведке и эксплуатации. Свердловск, 1969, с. 100.

77. Шифрина Э. Д. Совершенствование специальных методов обогащения полезных ископаемых.— В кн.: Итоги науки и техники. Серия: «Горное дело. Обогащение полезных ископаемых, 1966». М., ВНИИТИ, 1967.
78. Шумиловский Н. Н., Мельцер Л. В. Основы теории устройств автоматического контроля с использованием радиоактивных изотопов. М., Изд-во АН СССР, 1959.
79. Шумяловский Н. Н. и др. Гамма-фотонный метод автоматической выборки штучного концентрата из руд цветных металлов.— В кн.: Автоматизация процессов производства цветных металлов. Фрунзе, «Илим», 1964.
80. Якубович А. Л., Зайцев Е. И., Пржиялговский С. М. Ядернофизические методы анализа минерального сырья. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1973.
81. Ясюкевич С. М. Обогащение руд. М., Metallurgizdat, 1953.
82. Cierpisz S., Mironovisz W. Radiometryczna metoda automaticznego rozrozniania wozow kopalnianych napelnianych weglem i skala plona.— «Prace Glown. inst. górns», 1967, No. 423, 7 s.
83. Electro-pneumatic coal separator.— «Engineer», 1966, v. 222, No. 5762, p. 23.
84. Electronic coal separator.— «Mining magazine», Nov. 1972, p. 497.
85. Gamma scattering to sort coal from shale.— «Nucleonics», 1955, v. 13, No. 1, p. 71.
86. Gaudin A. M. e. a. Use of an indiced nuclear reaction for the concentration of beryl. Mining Engng, April 1950, v. 187, No. 4, p. 495.
87. Gooden Y. E. A. Sorting of lump ores by induced radioactivity. — «AMDEL Bull.», 1966, No. 1, p. 35.
88. Goodman R. N. e. a. Excited X-rays identify minerals as ore moves down conveyer belt.— «Canad. Electron Engng», 1966, v. 10, No. 6, p. 43.
89. Halfawy M., Senftle F. E. Absorption of Radionuclides of Minerals for are Benefication Purposes.— «Z. Physik. Chem.» (Frankfurt), New Series, 1957, v. 12, p. 196.
90. Moir D. N. Advances in mineral processing.— «Metals and Mater.», 1971, v. 5, No. 8, p. 142.
91. Mariacher B. C., Spence W. C. A look into the future mineral benefication.— «Mining Engng», July 1962, v. 14, No. 7, p. 57.
92. Radioactive tracer uses in the mining industry.— «Isotopes and Radiat. Technol.», 1964, v. 2, p. 18.
93. Ramdohr H. Radioaktivitat als Hilfsmittel bei Sortierverfahren in der Er-raufbereitung.— «Aufbereit.— Techn.», 1963, Bd. 4, Nr. 5, S. 214.
94. Reactor Handbook. V. IIIA, IIIB. N. Y.— London, 1962.
95. Senftle F. E., Gaudin A. M. Concentration of ores by Induced Activities.— «Nucleonic», 1951, v. 8, No. 5, p. 53.
96. Separatory coal by X-Ray.— «S. Afric. Mining. and Engng J.», 1966, v. 77, No. 3837.
97. Smith S. E., White P. A. A review of Uranium Ore Processing Research.— «Austral Mining», 1969, v. 61, No. 4, p. 50.
98. Uken E. A. e. a. The application of neutron activation analysis to sorting Witwatersrand gold-bearing ores.— «J. S. Afric. Inst. Mining and Metallur-gy», 1966, V. 67, No. 3, p. 99.
99. Woodcock J. T. Are dressing developments in Australia, 1964.— «Mining and Chem. Engng Rev.», 1965, v. 57, No. 7.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Условные обозначения	9
Глава 1. Общие вопросы теории. Элементы аппаратуры	10
1. Возможность использования различных излучений	10
2. Классификация ядернофизических методов сепарации	13
3. Общая характеристика условий облучения	18
4. Общая характеристика условий регистрации излучения	27
5. Основные узлы сортировочных установок	34
6. Чувствительность установок и статистическая характеристика процесса сепарации	46
7. Технологические свойства полезных ископаемых	52
Глава 2. Основные ядернофизические методы сепарации	63
1. Абсорбционные методы	63
2. Методы сепарации, основанные на регистрации рассеянного и других излучений, возникающих при взаимодействии первичного излучения с атомами вещества	78
3. Методы сепарации, основанные на регистрации мгновенного излучения ядерных реакций	82
4. Активационные методы	91
Глава 3. Элементы технологии ядернофизических методов сепарации	114
1. Принципиальная схема сортировки полезных ископаемых	114
2. Влияние грохочения на равномерность массы кусков в сортируемых классах крупности	117
3. Облучение сырья	122
4. Режимы сепарации	125
5. Экономическая оценка эффективности сепарации руд	132
Глава 4. Вопросы радиационной безопасности	134
Приложение	138
Список литературы	140

хр-3
жл 5

Цена 93 коп.

4 22 55

14

2.7678