

**В.Ф. МОНАСТЫРСКИЙ**, д-р техн. наук  
(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики  
им. Н.С. Полякова НАН Украины),

**И.А. МАКАЛИН**  
(Россия, Мирный, Институт "Якутнипроалмаз", АК "АЛРОСА")

## **ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ В РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СЕПАРАТОРАХ**

Технология обогащения алмазосодержащего сырья связана с переработкой большого объема исходной руды, так как содержание в ней полезного ископаемого (алмазов) очень низкое. Вкрапление алмазов в кимберлитовые руды не превышает 50 мм. Поэтому подготовку алмазосодержащего сырья к обогащению производят многостадийно, используя последовательно дробилки крупного дробления и мельницы мокрого самоизмельчения. Продукт на выходе из мельниц мокрого самоизмельчения находится в пределах  $-50+0$  ( $-30+0$ ) мм в зависимости от прогнозируемого максимально возможного размера кристалла алмаза для данного месторождения.

Крупные алмазы класса крупности  $-50+5$  мм обогащаются в пределах рентгенолюминесцентной (РЛ) сепарации. Однако кроме алмазов в общем объеме алмазосодержащего сырья находятся минералы (цирконы, кальциты, плагиоклазы), которые вносят погрешность в работу РЛС, снижая извлечение алмазов в концентрат.

В общем виде процесс извлечения алмазов и сопутствующих люминесцирующих минералов из алмазосодержащего сырья можно представить в виде многопараметрической модели, включающей структуру потока; научно-обоснованные вероятностные модели попадания количества минералов в заданный интервал, интервала между минералами; математические и словесные модели; алгоритм расчета качественно-количественных схем по исходным данным; особенности конструкции современных сепараторов (РЛС).

Для обоснования многопараметрической модели процесса извлечения минералов из алмазосодержащего сырья при помощи РЛС были приняты следующие допущения:

- распределение люминесцирующих минералов в общем объеме алмазосодержащего сырья подчиняется законам Пуассона или биномиальному (рис. 1, а, б);
- поток люминесцирующих минералов стационарен, без последствия, ординарен;
- конструкция РЛС снабжена многоканальной системой приемников ( $k$ ), распределение исходного продукта ( $Q_1$ ) по которым производится в равных частях ( $Q_1/k$ );
- при многостадийной обработке алмазосодержащего сырья переход от

## **Спеціальні та комбіновані методи**

одной стадии обогащения в РЛС к другой сопровождается изменением количества каналов – приемников ( $k$ ) при условии постоянной нагрузки на один канал;

- переход от одной стадии обогащения РЛС к другой сопровождается сложением характеристик независимых составляющих потоков алмазов и люминесцирующих минералов и при этом повышается их содержание;
- потери алмазов и люминесцирующих минералов в хвостах стадий обогащения не учитываем.

В реальных условиях эксплуатации РЛС соблюдение указанных допущений во многом зависит от условий эксплуатации и физических свойств минералов. Поэтому вероятностные модели потока алмазосодержащего сырья (модель попадания количества минералов в заданный интервал-дискретная величина; модель интервала времени между минералами – непрерывная величина) обосновывались экспериментально.

Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях на РЛС предприятий АК "АЛРОСА". Программой и методикой выполнения экспериментальных исследований предусматривалось:

- определить основные показатели качественно-количественной схемы обогащения алмазосодержащего сырья в РЛС ( $\gamma_i$  – количество концентрата в каждой стадии обогащения,  $\beta_i$  – содержание алмазов и люминесцирующих минералов) за определенный промежуток времени;
- определить случайный поток появления люминесцирующих минералов по отсечкам РЛС на протяжении фиксированного времени;
- определить количество минералов в концентрате и хвостовом продукте в течение фиксированного времени.

Результаты обработки выборок случайных потоков люминесцирующих минералов после обогащения в РЛС представлены на рис. 1. а, б.

Анализ полученных результатов показал, что:

- законы Пуассона и биномиальный равновероятно описывают дискретное распределение попадания количества минералов в заданный интервал;
- вероятностной моделью распределения интервала между люминесцирующими минералами являются с одинаковой вероятностью по критериям Пирсона, Колмогорова, Мизеса показательный и нормальный законы, оценки параметров которых зависят от количества исходного материала и содержания в нем минералов;
- для испытываемых концентратов достигнутое минимальное значение интервала составило 1,2 с;
- с повышением содержания люминесцирующих минералов в концентрате математическое ожидание интервала между ними снижается от 28,6 с (исходный материал) до 1,5 с (концентрат доводки);
- наибольшие потери алмазов при обогащении в РЛС наблюдались при интервале прохождения минералов через РЛС в пределах 1,2...2,0 с.

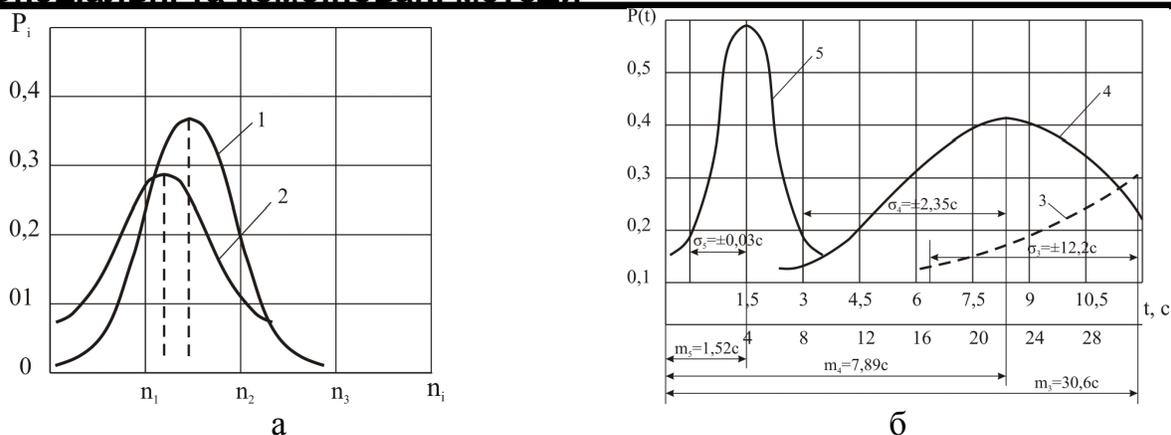


Рис. 1. Характеристики случайных потоков минералов:

- а, б – соответственно для дискретной и непрерывной случайных величин, кривые 1, 2 – соответственно законы Пуассона, биномиальный (рис. 1, а), нормальный закон плотности распределения интервала между минералами для исходного продукта, при извлечении в концентрат минералов до 75% (кривая 3,4); при извлечении в концентрат минералов до 100% (кривые 5)

Таким образом, многопараметрическую модель процесса обогащения алмазосодержащего сырья в РЛС с учетом экспериментальных данных можно представить следующим образом: поток алмазосодержащего сырья, состоящий из кимберлитовых пород с вкраплением алмазов, люминесцирующих минералов с содержанием в 1,5...2 раза более, чем алмазов и полудрагоценных минералов в исходном продукте, перемещается по лотку РЛС и разделяется равномерно по многоканальным приемникам. Основные характеристики потока алмазосодержащего сырья определяются из исходных данных ( $\gamma_1, \beta_1$ ), а для концентрата ( $\gamma_i, \beta_i, i = 2, 3 \dots n$ , где  $n$  – количество полученных концентратов) – путем расчета качественно-количественной схемы обогащения алмазосодержащего сырья в РЛС. В каждом канале производительность принимается равной  $Q/k$  (первая стадия обогащения), для последующих стадий – количество каналов условно сокращается так, чтобы производительность оставалась практически постоянной, а содержание в концентрате люминесцирующих минералов увеличивалось (суммарный показатель нескольких независимых потоков). При этом подходе поток структурно не изменяется, а независимые потоки алмазов и сопутствующих минералов размещаются по его длине в общем объеме пустых пород с интервалом, изменяющимся по нормальному или показательному законам, оценки параметров которых зависят от количества исходного продукта, содержания люминесцирующих компонентов, конструкции РЛС и технологии обогащения алмазосодержащего сырья. Минералы имеют различную форму (округлую, октаэдрическую, кубическую), а их случайная величина массы распределена по длине потока во времени дискретно и в каждый момент времени  $t_i$  определяется методом случайного выброса интервала на отрезке 0-1, на котором равномерно распределены ее значения соответственно от минимального до максимального.

## Спеціальні та комбіновані методи

Для подтверждения взаимосвязи между интервалом поступления люминесцирующих минералов и потерями их в хвостах были выполнены дополнительные исследования. Испытаниям подвергался четырехканальный сепаратор РМДС-4, рассчитанный на обработку алмазосодержащего сырья производительностью 100 кг/ч. По условиям испытаний каждый сепаратор (канал) был поставлен в одинаковые условия эксплуатации (проба руды массой 9,2 кг и коллекция имитаторов алмазов с заданными характеристиками по интенсивности рентгенолюминесценции ( $I_{ДК}$ ) и постоянной производительности). Содержание имитаторов в общем объеме сырья ( $\alpha$ ) изменялось от 0,3 до 80%. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

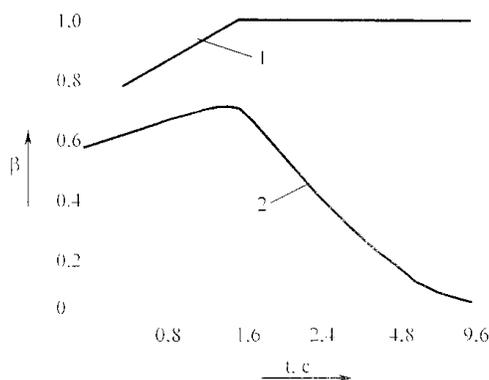


Рис. 2. Извлечение минералов сепараторами  
кривые 1, 2 соответственно извлечение минералов "сильных"  
по интенсивности люминесценции и "слабых"

Анализ полученных результатов показал, что:

- увеличение содержания имитаторов, которые следуют через зоны возбуждения и регистрации, в общем объеме сырья от 0,3 до 25% приводит к резкому повышению показателей по механическому извлечению РЛС;
- повышение показателей по механическому извлечению имеет ярковыраженный пик насыщения при интервале следования минералов ниже 1,6 с (рис. 2, кривые 1, 2);
- для слаболюминесцирующих и сильнолюминесцирующих минералов предел насыщения наступает примерно при одинаковом интервале их следования (рис. 2, кривые 1, 2);
- параметры вероятностной модели распределения интервала между минералами (математическое ожидание интервала и среднее квадратическое его отклонение) совпадают с пределом насыщения системы возбуждения и регистрации по механическому извлечению РЛС (рис. 1, кривая 3 и рис. 2, кривые 1, 2).

Таким образом, практически во всех сепараторах происходит насыщение тракта регистрации, в котором при помощи фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) преобразуется световая "вспышка" люминесценции алмазов в пропорциональный электрический сигнал. Наибольшее влияние на процесс насыщения тракта регистрации оказывает интервал следования люминесцирующих минералов.

## Спеціальні та комбіновані методи

Рассмотрим последовательно процесс насыщения тракта регистрации сепаратора, представленного упрощенной структурной схемой на рис. 3.

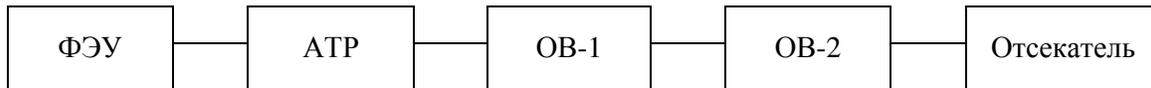


Рис. 3. Структурная схема

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, АТР – аналоговый тракт регистрации, ОБ-1, ОБ-2 соответствующие устройства, которые формируют сигнал "обнаружение" и "длительность задержки", отсекаль – устройство для отклонения минералов в концентрат

При низком содержании люминесцирующих минералов в питании сепаратора каждый из них попадает в зону облучения и регистрации через интервал времени значительно больший, чем необходим для отработки цикла "обнаружение-задержка-отсечка". При этом первоначально формируется сигнал "обнаружение" по амплитуде люминесценции минерала, а затем одновибраторы ОБ-1 и ОБ-2 формируют сигналы "длительность транспортной задержки" по переднему фронту сигнала "обнаружение" и "длительность отсечки" по окончании времени движения минерала из зоны облучения и регистрации до зоны его отсечки.

Временная диаграмма режима работы сепаратора при низком содержании минералов приведена на рис. 4. а, в с, из которой видно, что "обнаружение" (рис. 4. а) минералов происходит в моменты времени  $t_1$ ,  $t_4$  а суммарная "длительность транспортной задержки" (рис. 4. в) и "длительность отсечки" (рис. 4. с) не превосходят интервал времени следования минералов. В этом случае насыщение тракта регистрации не наступает.

На рис. 5, а, в, с представлена временная диаграмма режима работы сепаратора при высоком содержании люминесцирующих минералов в его питании, из которой видно, что сигналы "обнаружение" (рис. 5, а) минералов возникают в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_5$ ,  $t_8$ , а суммарная "длительность транспортной задержки" (рис. 5, в,  $t_1-t_4$ ) и "длительность отсечки" (рис. 5, с,  $t_4-t_6$ ) превышают интервал следования минералов. При этом следующий люминесцирующий минерал попадает в зону облучения и регистрации через интервал времени меньший, чем необходимо для отработки цикла "обнаружение-задержка-отсечка" и одновибраторы ОБ-1 и ОБ-2, формируя свои сигналы, не реагируют на поступающие на вход второй  $t_2$  и третий  $t_3$  сигналы "обнаружение". При таком режиме работы сепаратора независимо от того сколько сигналов "обнаружение" будет сформировано за интервал времени "длительность транспортной задержки" (рис. 4, в,  $t_1-t_4$ ) первого сигнала одновибратор ОБ-1 не будет реагировать на последующие сигналы "обнаружение" и второй и третий сигналы "обнаружение" будут потеряны. Аналогичные проблемы возникают при формировании сигнала "длительность отсечки" (рис. 4, с,  $t_4-t_6$ ).

Следовательно, конструкция существующих сепараторов накладывает ограничения на частоту следования люминесцирующих минералов, при которой наступает насыщение тракта регистрации (введение усилителя в режим насыщения, при котором его напряжение стремится к напряжению источника питания).

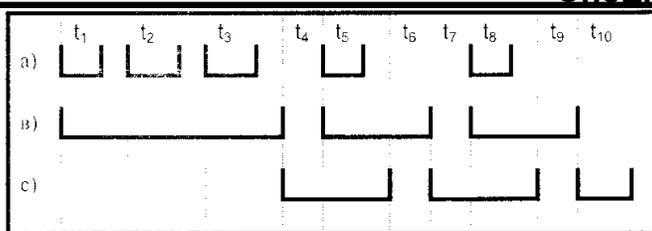


Рис. 4. Формирование сигналов при низком содержании минералов

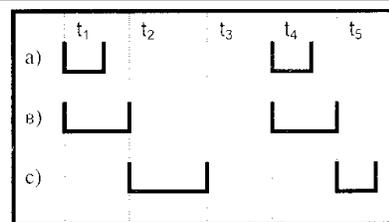


Рис. 5. Формирование сигналов при высоком содержании минералов

Для интенсификации работы люминесцентных сепараторов были разработаны следующие мероприятия по повышению эффективности работы РЛС:

- расширение предела интервалов поступления минералов в тракт регистрации РЛС, при котором наступает насыщение усилителя, путем введения в его конструкцию элементов, исключающих гальваническую развязку;
- снижение нестабильности работы усилителя (из-за изменения температуры, старения отдельных узлов в течение времени, наличия токов утечки и т.п.) и обеспечение требуемого коэффициента усиления для импульсной составляющей люминесцентного сигнала путем установки разделительных конденсаторов между отдельными каскадами усилителя;
- создание новой конструкции тракта регистрации, исключающей влияние "сильного" сигнала люминесценции алмаза или сопутствующего минерала на процесс последующей обработки сигнала от слаболюминесцирующего минерала;
- исключение потерь люминесцирующих минералов, следующих один за другим без или с небольшим промежутком, в хвосты, путем ввода в схему тракта регистрации блоков определения числа последовательно поступающих минералов и задержки, которая работает по заданному алгоритму;
- исключение потерь слаболюминесцирующих минералов в хвосты путем изменения схемы фильтрации уровня шумов.

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана многопараметрическая модель процесса извлечения алмазов из алмазосодержащего сырья при помощи люминесцентных сепараторов, необходимая для имитации потоков алмазов в РЛС.
2. Установлены пределы насыщения системы возбуждения и тракта регистрации РЛС, которые возникают при интервале следования люминесцирующих минералов ниже 1,6 с.
3. Разработаны рекомендации по совершенствованию конструкции РЛС, позволяющие минимизировать потери алмазов при извлечении их методом люминесцентной сепарации.

© Монастырский В.Ф., Макалин И.А., 2011

*Надійшла до редколегії 03.02.2011 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*