

УДК 622.7:658.5 - 52

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РУД В НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЕМКОСТЯХ ПЕРЕД ОБОГАЩЕНИЕМ

Л.М.СОСИНСКИЙ

Для эффективной работы обогатительных фабрик необходимо, чтобы руда, подаваемая на обогащение, имела стабильные во времени качественные характеристики как по содержанию различных компонентов, так и по гранулометрическому составу. Целям стабилизации служит, с одной стороны, планирование горных работ, а с другой, использование специальных усреднительно-накопительных устройств. Статья посвящена вопросам совершенствования организации работы этих устройств с целью повышения эффективности последующих процессов обогащения, что способствует более рациональному использованию ресурсов горно-обогатительного производства.

Усреднительные устройства можно разделить на две основные группы. К первой относят склады и штабели с послойной загрузкой руды и торцевой разгрузкой. Если слои в штабеле достаточно тонкие, то содержание различных компонентов внутри слоя меняется мало. При отгрузке происходит смешивание в равных количествах руды из всех слоев, что обеспечивает высокую степень усреднения. Этот тип устройств хорошо изучен [2].

На многих горно-обогатительных предприятиях используют усреднительные устройства, относящиеся ко второй группе, — устройства с донным выпуском. Это бункера, представляющие собой горизонтально протяженные емкости, которые могут быть разделены на ряд относительно изолированных ячеек. Бункеры разгружаются на сборный конвейер через выпускные воронки, расположенные в их основании в один или несколько рядов, а загружаются с помощью тележки, которая движется вдоль продольной оси бункера либо непрерывно, либо дискретно. В первом случае руда ложится наклонными конусообразными слоями, а во втором — в отдельные ячейки бункера, причем слои, имеющие форму поверхности конуса, ложатся один на другой. В обоих случаях происходит сегрегация руд по крупности, и как следствие, сегрегация по другим качественным характеристикам. При описании потока на выходе таких устройств возникают трудности, которые в значительной степени преодолены [5, 6].

К устройствам описываемого типа относятся также односекционные бункера и рудоспуски. Рудоспуск загружается с помощью рудничного транспорта, разгружающегося на различных горизонтах, а разгружается с помощью расположенной в нижней его части системы затворов. Можно считать, что загрузка рудоспуска происходит горизонтальными слоями, а истечение руды, в за-

висимости от размера выпускных отверстий, имеет либо гравитационный, либо гидравлический характер [4]. В последнем случае столб руды опускается как единое целое, и в первую очередь истекает руда, находящаяся в нижней части столба. Рудоспуски выполняют также роль буферных емкостей между рудником и обогащательной фабрикой. Вместе с тем бункера и системы рудоспусков можно использовать для усреднения поступающей руды, хотя в силу описанных выше особенностей загрузки и разгрузки их усреднительная способность невелика. Однако эффективность усреднения с помощью устройств второй группы можно повысить за счет управления входным и выходным потоками руды.

В качестве примера управления качеством потока руды рассмотрим комплекс задач управления для условий Тырнаузского вольфрам-молибденового комбината. Здесь руда от добычи до обогащения проходит через цепочку накопительных емкостей, что позволяет разбить задачу управления потоками руды на ряд последовательных, связанных между собой задач оперативного планирования и управления. Руда из забоев транспортируется в рудоспуски, причем за каждым из рудоспусков закрепляется определенная группа забоев. Качество руды характеризуется несколькими показателями (среди них — гранулометрический состав), стабильность которых существенно влияет на эффективность обогащения. Из рудоспусков, количество руды в каждом из которых должно лежать в заданных пределах, руда составами небольшой емкости подается на дробилку крупного дробления, откуда по транспортеру поступает в бункер корпуса самоизмельчения, состоящий из двух протяженных секций. Из питателей, расположенных на дне бункера, руда направляется на мельницы самоизмельчения, эффективность работы которых в значительной степени зависит от стабильности гранулометрического состава поступающей на них руды. Далее объединенный поток руды поступает на обогащение, причем для эффективности этого процесса достаточно стабилизировать показатели качества относительно некоторых средних значений в течение промежутков времени, не менее трех-четырех смен [1]. Обеспечение такого кусочно-постоянного режима стабилизации позволяет повысить извлечение вольфрама в концентрат на 3-3,5 %.

Поскольку на обогащение поступает поток руды, полученный за счет смешивания материала, отгружаемого по всей длине бункера, то содержание различных компонентов в выходном потоке близко к среднему содержанию их в бункере. Это упрощает управление разгрузкой бункера с помощью решения задачи стабилизации средней крупности выходного потока руды. Стабилизация по остальным параметрам достигается за счет планирования и оперативного управления разгрузкой рудоспусков. Составление плана заключается в том, что период планирования (три-четыре смены в данном случае) делится на более короткие промежутки, и работа рудоспусков планируется так, чтобы разброс качества руды между отдельными промежутками был как можно меньше. Обычно в качестве критериев планирования берут средние квадратические отклонения от заданных средних содержаний соответствующих компонентов. Но поддержание постоянных средних значений в течение длительного времени может стать технологически сложной задачей, требующей для своего решения

больших усреднительных емкостей. Для эффективности обогащения достаточно поддерживать среднее содержание на одном уровне в течение относительно непродолжительного периода, после чего можно перейти на новый уровень, т.е. среднее содержание может представлять собой кусочно-постоянную функцию с периодом постоянства три-четыре смены.

Таким образом, задача планирования разгрузки ставится как задача минимизации среднего квадратического отклонения от среднего значения, которое определяется в процессе решения. Перейдем к формальной постановке задачи, отметив, что, поскольку высота столба руды в рудоспуске существенно превышает его диаметр, можно считать, что руда вытекает из рудоспуска в том же порядке, что и загружается, т.е. имеет место гидравлическое течение материала. Итак, пусть для каждого i и k известна функция $f_{ik}(q_i)$ - общее количество k -го компонента в руде, отгружаемой из i -го рудоспуска за время от начала периода планирования. В качестве аргумента здесь выступает q_i - количество отгружаемой руды ($i = 1, 2, \dots, I$; $k = 1, 2, \dots, K$). Требуется определить q_i^t - количество руды, отгружаемой из i -го рудоспуска за t смен ($t = 1, 2, \dots, T$) при выполнении следующих ограничений.

1. Величины q_i^t растут с увеличением t , и q_i^t не может быть большим, чем Q_i^t - количество руды, загружаемой в i -й рудоспуск за t смен:

$$q_i^t \geq q_i^{t-1}, \quad i=1, 2, \dots, I, \quad t=2, \dots, T; \quad (1)$$

$$Q_i^t \geq q_i^t \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, I, \quad t=1, 2, \dots, T. \quad (2)$$

2. Количество руды, отгруженное из системы рудоспусков за t смен, и количество руды, отгруженное за период планирования, соответственно

$$q^t = \sum_{i=1}^I q_i^t, \quad t=1, 2, \dots, T, \quad q = q^T. \quad (3)$$

3. Сменный план $\underline{Q}$ должен быть выполнен, причем отгрузка из рудоспусков за время смены не должна превышать пропускной способности последующих звеньев $\bar{Q}$:

$$\underline{Q} \leq q^t - q^{t-1} \leq \bar{Q}, \quad t=2, \dots, T, \quad \underline{Q} \leq q' \leq \bar{Q}. \quad (4)$$

4. Среднее содержание k -го компонента в руде α_k^t , отгруженной за t -ю смену, должны лежать в заданных пределах:

$$\underline{A}_k \leq \alpha_k^t \leq \bar{A}_k, \quad k=1, 2, \dots, K, \quad t=1, 2, \dots, T, \quad (5)$$

где

$$\alpha_k^t = \frac{\sum_{i=1}^I [f_{ik}(q_i^t) - f_{ik}(q_i^{t-1})]}{q^t - q^{t-1}}.$$

5. Среднее содержание k -го компонента в руде, отгруженной за период планирования,

$$\alpha_k = \frac{\sum_{i=1}^I f_{ik} (q_i^T) q_i^T}{q} \quad (6)$$

В качестве критерия, определяющего эффективность планирования, берется, как было сказано, среднее квадратическое отклонение. Поскольку отклонение должно быть определено по нескольким компонентам, то в критерий эти компоненты можно включить с весами $\beta_k = (\sum_{k=1}^K \beta_k = 1)$ и критерий примет вид

$$S = \sum_{k=1}^K \beta_k \left[\sum_{t=1}^T (\alpha_k^t - \alpha_k)^2 \frac{q^t - q^{t-1}}{q} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Минимизация критерия (7) при ограничениях (1)-(6) может быть выполнена методом нелинейного программирования. Решение нелинейной оптимизационной задачи высокой размерности может потребовать для своей реализации больших затрат машинных ресурсов. В данном случае проблема может быть существенно упрощена, так как, учитывая приближенный характер исходных данных, следует искать не оптимальное, а просто хорошее, близкое к оптимальному решение. Для того, чтобы избавиться в критерии от квадратных корней, будем минимизировать не среднее квадратическое отклонение, а средневзвешенную дисперсию. Если теперь зафиксировать значения q и α_k , то задача может быть решена методом динамического программирования [3], а хорошее значение α_k подобрано итерациями.

Однако если число рудоспусков превышает два-три, то и при таком подходе затраты машинных ресурсов оказываются чрезмерно велики. Поэтому целесообразно использовать подробно описанный в работе [8] метод последовательной локальной оптимизации, при котором метод динамического программирования применяется многократно, но каждый раз на «обедном» множестве допустимых решений. Кратко опишем основанный на этом методе алгоритм, дающий приближенное решение поставленной задачи.

1. Задать α_{k0} - начальные значения величин α_k ; $k = 1, 2, \dots, K$.
2. Задать q_{i0}^t - начальные значения величин q_i^t ; $i = 1, 2, \dots, I$; $t = 1, 2, \dots, T$.
3. В окрестности точки ($q_{10}^1, \dots, q_{I0}^T$) найти минимальное значение критерия

$$D = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^K \beta_k \sum_{t=1}^T (\alpha_k^t - \alpha_{k0})^2 (q^t - q^{t-1})$$

при ограничениях (1)-(5).

4. Если значение критерия, полученное в п.3 меньше, чем значение полученное на предыдущем шаге, то, взяв решение ($q_1^1, \dots, q_I^T$) в качестве начальной точки, вернуться к п.3.

5. Вычислить α_k по формуле (6). Если $\alpha_k \neq \alpha_{k0}$, то заменить α_{k0} на это новое значение и вернуться к п.2. В противном случае приближенное решение найдено.

Можно, кроме того, найти перебором и оптимальное значение q .

Отметим, что если руда однокомпонентна и качество ее в каждом рудоспуске мало меняется за период планирования, то можно воспользоваться специально разработанным методом [7].

Описанная задача позволяет получить план разгрузки системы рудоспусков на каждую смену. После того, как сменный план определен, его необходимо реализовать так, чтобы обеспечить наиболее эффективную работу последующих усреднительных емкостей. При подаче руды из рудоспусков на дробилку крупного дробления специальными составами реализация плана заключается в том, чтобы определить очередность подачи составов под погрузку и очередность их разгрузки. Поскольку за каждым из рудоспусков закреплена определенная группа забоев, то можно считать, что в течение смены колебания качества руды в потоке, отгружаемом из каждого отдельного рудоспуска, малы по сравнению с колебаниями качества между рудоспусками. Поэтому приближенно можно считать качество руды в рудоспуске в течение смены постоянным. Для этого случая известно, что эффективность усреднения в накопительных устройствах различных типов существенно повышает использование так называемых циклических алгоритмов управления, суть которых заключается в том, что очередность подачи составов от рудоспусков на разгрузку циклически повторяется, причем хорошие результаты дает не только оптимальный, но и практически любой другой цикл. Следовательно, целесообразно стремиться к построению цикла, который определяется достаточно легко, например, следующим способом.

Средний интервал между погрузкой составов под i -м рудоспуском $\theta_i = T_{см} / \rho_i$, где $T_{см}$ — продолжительность смены; ρ_i — количество составов с рудой, которая должна быть в течение смены отгружена из i -го рудоспуска. Тогда ориентировочные моменты отправления составов от i -го рудоспуска

$$\tau_i^1 = \frac{\theta_i}{2}, \quad \tau_i^2 = \tau_i^1 + \theta_i, \dots, \tau_i^{\rho_i} = \tau_i^{\rho_i-1} + \theta_i.$$

После этого для всех $i = 1, 2, \dots, I$ образуются пары чисел (τ_i^j, i) , которые упорядочиваются по увеличению τ_i^j . Вторые элементы пар задают последовательность адресов для порожних составов. Порядок подачи составов может быть уточнен, если учесть время движения составов от рудоспусков к дробилке. Управление теперь заключается в том, чтобы выдерживать в течение смены полученное расписание.

Рассмотрим последние в цепочке задач управления задачу разгрузки бункера корпуса самоизмельчения и тесно связанную с ней задачу загрузки. Как было отмечено, основным показателем, по которому следует усреднять руду в потоке, вытекающем из бункера, является средняя крупность. В рассматриваемом случае на каждую мельницу самоизмельчения работают две ячейки бункера, по одной из каждой секции. Поскольку при загрузке ячейки происходит сегрегация руды по крупности, причем руда крупных фракций скатывается к основанию конуса погрузки, то при разгрузке ячейки по закону гравитационного истечения средняя крупность вначале растет, в течение некоторого времени остается постоянной, а в конце разгрузки снова увеличивается.

Чтобы сгладить эти броски по крупности, предлагается накладывать на конец разгрузки одной из двух параллельных ячеек начало разгрузки другой. Если считать, что распределение руды по крупности меняется во времени незначительно, то момент наложения может быть определен по зависимости средней крупности в потоке руды, поступающей на мельницу самоизмельчения, от времени

$$h(t; \tau) = \begin{cases} g\left(\frac{t}{2}\right) + g\left(\frac{t}{2} + (T - \tau)\right) & \text{при } t \in [0, \tau]; \\ g\left(t - \frac{\tau}{2}\right) & \text{при } t \in [\tau, T]. \end{cases}$$

где $g(t)$ — зависимость средней крупности истекающей из ячейки руды от времени, $t \in [0, T]$; T — время истечения руды из ячейки бункера; τ — время, в течение которого осуществляется одновременное истечение руды из двух параллельно работающих ячеек (считаем, что скорость истечения из каждой ячейки при этом уменьшается вдвое).

Теперь τ можно искать, минимизируя, например, интеграл $\int_0^T [h(t; \tau) - H]^2 dt$, где H — среднее значение функции $g(t)$. Для обеспечения одновременной разгрузки двух параллельных ячеек к концу разгрузки одной из них должна быть загружена другая, что требует специальной организации управления движением загрузочной тележки. Алгоритм управления, который подробно здесь не описывается, сводится к выбору группы порожних ячеек и к организации их циклической загрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азбель Е.И., Круглов А.А., Устинов И.Д. Особенности оптимизации обогатительных процессов при усреднении качественного состава входного потока руды. — Изв. вузов, Цветная металлургия, 1988, № 1.
2. Бастаян П.П., Азбель Е.И., Ключкин Е.И. Теория и практика усреднения руд. М., Недра, 1979.
3. Беллман Р. Динамическое программирование. М., Иностранная литература, 1960.
4. Дженнике Э.В. Складирование и выпуск сыпучих материалов. М., Мир, 1968.
5. Панич Ю.В., Пайкин М.В. Один класс математических моделей усреднения руд в больших бункерах. — Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1977, № 1.
6. Панич Ю.В., Пайкин М.В. Оптимизация процесса усреднения при пульсирующем режиме работы бункера в условиях сегрегации руды при загрузке. — Изв. вузов, Горный журнал, 1980, № 10.
7. Соснянский Л.М. Об одном алгоритме составления оперативного плана. — В кн.: Вычислительная техника в системах управления горными предприятиями. Л., изд. ЛГИ, 1971.
8. Соснянский Л.М. О приближенном решении многоступенчатых задач большой размерности. — В кн.: Численные методы в краевых задачах математической физики. Л., изд. ЛИСИ, 1985.
9. Школьник А.Д., Азбель Е.И., Соснянский Л.М. Об эффективности алгоритмов оперативного управления качеством руд, поступающих на переработку. — В кн.: Управление горным производством. Межвузовский сборник, вып. 1, Свердловск, изд. СГИ, 1974.