

УДК 622.271

*О.Н. Мальгин, В.Н. Сытенков***ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
«КАРЬЕР-ЗАВОД» ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРУПНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Семинар №12

Оптимизация производительности системы «карьер-завод» является сложной и малоисследованной проблемой горно-перерабатывающего производства. Такое производство, созданное на базе месторождения Мурунтау, имеет ряд неоспоримых преимуществ перед другими производствами аналогичного типа – оно расположено компактно, образует единый комплекс с одинаковой формой собственности под общим управлением, характеризуется динамичным развитием на базе одного месторождения. Все это упрощает проведение исследований и стимулирует исполнителей на поиск оптимизационных решений.

В настоящее время производительность завода определяется, главным образом, директивно с обоснованием в минимальном объеме технической возможности и экономической целесообразности. Под эту производительность подбирается производительность карьера по руде и горной массе, а уже затем на основе математической модели месторождения с использованием компьютерной технологии строится график ведения горных работ в карьере. Однако директивное задание годовой производительности карьера по руде в реальной практике далеко не всегда относится к лучшему решению, следствием которого является упущенная прибыль и снижение степени использования геоэкономического потенциала месторождения. Данный вопрос получил в настоящей работе новое развитие.

Горнодобывающий комплекс и металлургический завод по переработке руд рассмотрены как единая система, оптимизация которой может быть произведена по величине дисконтированного потока кумулятивной чистой прибыли (NPV(D)), максимальное значение которого достигается при определенном соотношении мощности добывающего и перерабаты-

вающего комплекса. Причем эти мощности могут быть равны между собой, или мощность добывающего комплекса превосходит перерабатывающую мощность на определенную величину. В этом случае излишки руды направляются на склад в качестве сырьевых запасов будущих периодов. Содержание в этой руде, как правило, значительно ниже содержания в перерабатываемой руде.

Теоретическое рассмотрение вопроса об оптимальной мощности горно-перерабатывающего комплекса по критерию дисконтированной накопленной прибыли показало, что определяющими показателями для принятия данного решения являются:

- бортовое содержание металла для переработки на заводе (C_6^3), представляющее собой традиционно рассматриваемое C_6 с учетом удельных амортизационных отчислений при сроке амортизации капитальных затрат, равном времени дисконтирования;
- бортовое содержание металла при складировании руды ($C_6^{ок}$), представляющее собой C_6 с учетом удельных затрат, возникающих в связи с перевалкой руды – карьер – склад – завод.

Если $C_6^3 \leq C_6^{ок}$, то мощность комплекса должна определяться таким образом, чтобы вся руда, добываемая на карьере, по возможности без складирования отправлялась на завод.

Если $C_6^3 \geq C_6^{ок}$, то формирование складов экономически оправдано, но только для бедных руд с содержанием C в интервале ($C_6^3 - C_6^{ок}$).

Предложена итеративная процедура решения этой задачи, состоящая в переборе различ-

ных значений назначаемой мощности завода и вычисляемой мощности карьера из условия, что вся руда, добываемая из карьера с содержанием выше C_g^3 , будет поступать на переработку на завод.

Основные теоретические положения по оптимизации производительности системы «карьер-завод» сводятся к следующему.

Стратегия развития системы в целом определяется:

- Стратегией развития горного производства.
- Стратегией развития перерабатывающего предприятия.
- Стратегией формирования рудопотоков из карьера на завод, из карьера на склады, со складов на завод.

Эти стратегии должны быть согласованы между собой.

Стратегия развития добывающего производства определяется объемом руды, направляемой на переработку, и объемом руды, направляемой на склад в качестве запасов сырья будущих периодов.

Стратегия развития перерабатывающего предприятия определяется вводом новых мощностей, развитием инфраструктуры и пр.

Стратегия формирования рудного потока на завод определяется комбинацией рудных потоков из карьера и со складов. При этом часть руды из карьера направляется вновь на склады в качестве сырьевых запасов будущих периодов. Однако содержание в этой руде меньше, чем в руде, направляемой со складов на завод.

Суммарный поток горной массы из карьера $G(t)$ складывается из потока вскрыши $V(t)$ и потоков $R_i^*(t)$ с содержанием $C_i(t)$ в i -том сорте руды:

$$G(t) = V(t) + \sum R_i^*(t)$$

В то же время максимально возможная на данный момент производительность карьера $Q_g(t)$ определяется наличием горно-транспортного оборудования соответствующей инфраструктуры. При этом должно выполняться условие:

$$G(t) \leq Q_g(t) \quad (\text{ограничение 1})$$

Развитие горного производства определяется ростом его производительности (т/год за год):

$Q_g'(t) = dQ_g(t)/dt$, если производительность нарастает $Q_g'(t) = 0$ если такой рост отсутствует.

Потоки руды из карьера (разных сортов) в общем случае разделяются на поток $R_i^{(1)*}(t)$, идущий непосредственно на завод, и поток $R_i^{(2)*}(t)$, идущий на склад соответствующего сорта i :

$$R_i^*(t) = R_i^{(1)*}(t) + R_i^{(2)*}(t), \text{ при этом}$$

$$R_i^{(1)*}(t) \geq 0, R_i^{(2)*}(t) \geq 0.$$

Содержание металла в этих потоках равно $C_i(t)$.

В свою очередь на завод поступает руда $R_i^{(1)}(t)$ непосредственно из карьера и потоки $R_i^{(2)}(t)$ со складов i -го сорта. Очевидно, что $R_i^{(1)}(t) = R_i^{(1)*}(t)$, и $R_i^{(2)}(t) \geq 0$.

Суммарное количество руды $S_i(t)$, накопленной на i -ом складе к моменту t , равно:

$$S_i(t) = \int_{(0,t)} (R_i^{(2)*}(t) - R_i^{(2)}(t)) dt .$$

(За начало отсчета времени $t = 0$ принят момент начала освоения месторождения). При этом в любой момент времени должно выполняться условие:

$$S_i(t) \geq 0. \quad (\text{ограничение 2})$$

Руда $R(t)$, приходящая на завод из карьера и со складов, смешивается и поступает на переработку:

$$R(t) = \sum (R_i^{(1)}(t) + R_i^{(2)}(t)).$$

Среднее содержание $C(t)$ в руде, идущей на переработку, получается усреднением по сортам и потокам из карьера и со складов:

$$C(t) = [\sum (C_i(t) R_i^{(1)}(t) + C_i R_i^{(2)}(t))] / R(t).$$

Здесь принято, что руда, приходящая с i -го склада, имеет постоянное среднее содержание C_i .

Поток конечного продукта $Me(t)$ подсчитывается как:

$$Me(t) = R(t) C(t) k_{\text{извл}}$$

где $k_{\text{извл}}$ – коэффициент извлечения, вообще говоря, зависящий от среднего содержания в руде.

Производительность перерабатывающего предприятия $Q_f(t)$ задает максимальный поток руды, который может принять завод:

$$R(t) \leq Q_f(t). \quad (\text{ограничение 3})$$

Развитие перерабатывающего предприятия определяется ростом его мощности (т/год за год):

$Q'_f(t) = dQ_f(t)/dt$, если мощность нарастает, 0 – в противном случае

Денежный поток (\$/год) $D(t)$ определяется как разность потока дохода $DD(t)$ и расхода $DR(t)$:

$$D(t) = DD(t) - DR(t).$$

Доход от продажи конечного продукта $DD(t)$ определяется выпуском конечного продукта и ценой на него за вычетом налогов с выручки (royalty):

$$DD(t) = Me(t) C_{met},$$

где C_{met} – цена конечного продукта.

Поток расходов:

$$DR(t) = DR_1(t) + DR_2(t) + DR_3(t) + DR_4(t) + DR_5(t) + DR_6(t) + DR_g(t) + DR_f(t),$$

где $DR_1(t)$ – расходы на ведение горных работ; $DR_2(t)$ – расходы на транспортировку пустой породы в отвалы; $DR_3(t)$ – расходы на транспортировку руды на завод; $DR_4(t)$ – расходы на транспортировку руды на склады; $DR_5(t)$ – расходы на погрузку и транспортировку руды со складов; $DR_6(t)$ – расходы на переработку руды до получения конечного продукта, включая амортизацию и расходы периода; $DR_g(t)$ – расходы на развитие горного комплекса; $DR_f(t)$ – расходы на развитие перерабатывающего комплекса.

Расходы на развитие завода $R_f(t)$ и горного комплекса $R_g(t)$ пропорциональны темпу наращивания мощности соответственно предприятия и карьера:

$$R_f(t) = k_1 Q'_f(t),$$

$$R_g(t) = k_2 Q'_g(t),$$

где коэффициенты k_1 и k_2 имеют размерность (\$ за т/год).

Строго говоря, эти коэффициенты зависят от уже достигнутой мощности, так как расходы на развитие с нуля значительно превосходят дополнительные расходы на наращивание мощности уже работающего предприятия. В

простейшем случае, когда коэффициент k_1 постоянен, суммарные расходы на достижение максимальной мощности предприятия Q_{fmax} пропорциональны этой максимальной мощности:

$$R_{fsum} = \int R_f(t) dt = \int k_1 Q'_f(t) dt = k_2 Q_{fmax}.$$

То же самое относится к горному комплексу. В общем случае зависимость суммарных расходов на развитие будет нелинейной возрастающей функцией от максимальной мощности.

Как говорилось выше, в качестве критерия работы комплекса в целом мы принимаем суммарную дисконтированную прибыль за все время деятельности предприятия:

$$W = \int_{(0,T)} (DD(t) - DR(t)) dt \exp(-\lambda t),$$

где λ – коэффициент дисконтирования.

Этот критерий должен быть максимизирован с учетом ограничений (1, 2, 3), а также ограничений на развитие горных работ (максимальная скорость углубки, минимальная ширина рабочих площадок, предельные углы откосов уступов и бортов, ограничения по транспортной схеме и пр.). Механизм оптимизации по суммарной дисконтированной прибыли работает следующим образом.

При снижении производительности системы получение прибыли сдвигается на более поздние сроки и подвергается большему дисконтированию. С другой стороны увеличение производительности системы связано с увеличением расходов на ее развитие. Компромисс между этими факторами дает оптимальную мощность предприятия.

Из-за эффекта дисконтирования целесообразно отнестись вскрышу на возможно более поздний срок. Однако этому препятствуют горно-технические ограничения на соотношение между добычными и вскрышными работами.

На целесообразность использования складов низкосортных руд влияют следующие факторы. С одной стороны использование складов влечет дополнительные расходы на транспортировку руды на склады, со складов и на погрузку. Кроме того, разделение руды на сорта предполагает селективную отработку, что удорожает добычу. С другой стороны низкосортные руды во всех случаях добываются, как правило, попутно. Поэтому затраты на добычу 1 т руды практически равны затратам на 1 т

вскрышных пород, что существенно ниже затрат на добычу 1 т товарной руды. Поэтому такую руду целесообразно с течением времени вовлечь в переработку. При этом прибыль от переработки низкосортной руды будет подвергаться меньшему дисконтированию.

Рассмотрим вариант, когда горный комплекс сравнительно быстро выводится на максимальную производительность $G(t) = Q_{g\max} = \text{const}$. Примем также условно, что распределение содержания в извлекаемой горной массе постоянно во времени. Тогда, очевидно, что для оптимальной загрузки перерабатывающего завода нужно отправлять на него всю руду с содержанием выше некоторого значения $C_{\text{зав}}$ при котором мощность завода будет загружена полностью, и содержание металла в руде, отправляемой на завод, будет максимальным. При этом $C_{\text{зав}}$ будет играть роль бортового содержания, выше которого руда отправляется в передел, а ниже – на склад.

Рассмотрим задачу выбора оптимальной мощности $Q_{f\max}$ завода, считая, что завод выводится на максимальную мощность в начальный момент и рудопоток со складов отсутствует. В действительности мы найдем оптимальное значение величины $C_{\text{зав}}$ а оптимальная мощность тогда определяется как достаточная для переработки потока руды из карьера с содержанием не ниже $C_{\text{зав}}$. В рассматриваемом случае расходы, связанные с горным комплексом будут постоянны, и их можно не учитывать в критерии. В этом случае мы получаем:

$$R(t) = R = Q_{f\max},$$

т.е. поток руды, поступающей на завод равен его полной мощности.

Выпуск металла тоже будет постоянным и определяется потоком руды с содержанием не ниже $C_{\text{зав}}$ и средним содержанием в этом потоке:

$$\text{Me}(t) = \text{Me} = \text{const}.$$

Критерий оптимального значения мощности завода при заданной производительности горного комплекса имеет вид:

$$W = \int_{(0, \infty)} (DD(t) - DR(t)) dt \exp(-\lambda t) dt.$$

Причем доход постоянен и равен:

$$DD(t) = \text{Me} \Pi_{\text{мет}},$$

где $\Pi_{\text{мет}}$ – принятая цена на металл.

Расход $DR(t)$ складывается из транспортных расходов, расходов на переработку руды и капитальных затрат на развитие завода:

$$DR(t) = Z_{\text{ткз}} R(t) + Z_{\text{пр}} R(t) + DR_f(t) = (Z_{\text{ткз}} + Z_{\text{пр}}) Q_{f\max} + DR_f(t),$$

где $Z_{\text{ткз}}$ – себестоимость транспортировки руды из карьера на завод; $Z_{\text{пр}}$ – себестоимость переработки руды; $DR_f(t)$ – денежный поток на развитие завода.

После интегрирования, принимая во внимание, что все расходы на развитие производятся в начальный момент времени, получаем:

$$W = T[\text{Me} \Pi_{\text{мет}} - (Z_{\text{ткз}} + Z_{\text{пр}}) Q_{f\max}] - k_2 Q_{f\max},$$

где $T = 1/\lambda$ – время дисконтирования; k_2 – удельный расход на наращивание мощности (\$ за т/год); $k_2 Q_{f\max}$ – суммарные капитальные затраты.

Таким образом, наш критерий равен чистой прибыли от работы перерабатывающего предприятия за время T с учетом капитальных затрат. Время дисконтирования T при годовом дисконте 10 % будет 10 лет, при 15 % — 7 лет, при 20 % — 5 лет.

Для определения оптимальной производительности системы «карьер – завод» приравняем к нулю производную суммарной дисконтированной прибыли по мощности $dW / dQ_{f\max} = 0$ и получаем:

$$(d\text{Me} / dQ_{f\max}) \Pi_{\text{мет}} = (Z_{\text{ткз}} + Z_{\text{пр}}) + k_2 / T.$$

Принимаем, что на завод поступает вся руда с содержанием выше некоторого $C_{\text{зав}}$. Поэтому приращение выхода металла $d\text{Me}$ за счет приращения рудопотока dR (в следствие снижения $C_{\text{зав}}$) будет идти с содержанием $C_{\text{зав}}$. Тогда:

$$d\text{Me} / dQ_{f\max} = d\text{Me} / dR = C_{\text{зав}}.$$

Откуда:

$$C_{\text{зав}} = [(C_{\text{ткз}} + C_{\text{пр}}) + k_2 / T] / C_{\text{мет}}.$$

Заметим, что экономически выгодное значение бортового содержания, при котором доход от реализации металла уравнивается с расходом на переработку руды, равно:

$$C_0 = (C_{\text{ткз}} + C_{\text{пр}}) / C_{\text{мет}}$$

и оказывается ниже, чем $C_{\text{зав}}$.

Таким образом, оптимальная мощность перерабатывающего завода должна быть выбрана так, чтобы обеспечить переработку всей руды, поступающей из карьера с содержанием не

Рис. 1. Взаимосвязь кумулятивного дисконтированного денежного потока (NPV) от производительности системы «карьер-завод»

ниже $C_{зав}$. (Коэффициент k_2 в этом случае выражает удельный расход на наращивание дополнительной мощности для переработки низкосортной руды, а величина k_2/T соответствует амортизационным отчислениям на тонну руды при сроке амортизации капитальных затрат $T=1/\lambda$).

Низкосортная руда с содержанием между $C_{зав}$ и C_6 могла бы складироваться и использоваться (на имеющихся мощностях) в тот период, когда поступление руды из карьера начнет сокращаться и перестанет обеспечивать производительность завода. Но при этом появляются дополнительные расходы на транспортировку руды на склад и ее погрузку при отправке со склада, и при этом меняется экономически выгодное значение бортового содержания. Оно становится равным:

$$C_6^* = (C_{ткз} + C_{тсз} + C_{пр}) / C_{мет},$$

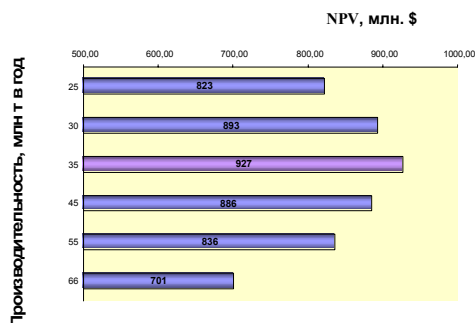
где $C_{ткз}$ – себестоимость транспортировки руды из карьера на склад; $C_{тсз}$ – себестоимость погрузки и транспортировки руды со склада на завод.

Если значение C_6^* выше чем $C_{зав}$, то формирование складов низкосортной руды оказывается экономически не оправданным, и горная масса с содержанием между $C_{зав}$ и C_6 должна считаться пустой породой, а вся руда идет непосредственно на завод. В противном случае формирование складов целесообразно.

Оптимальная мощность добывающего комплекса $R_{опт}$ должна быть такой, чтобы обеспечить при определенном значении $C_{зав}$ загрузку завода при его оптимальной мощности Q_{fmax} . В общем случае можно образом определить величину $R_{опт}$ как функцию Q_{fmax} .

$$R = Q_f / \int_0^{C_{зав}} F(C) dC.$$

Здесь $F(C)$ – плотность распределения вероятности содержания металла в добываемой руде, которая зависит от особенностей морфологии и внутреннего строения рудных тел.



Учитывая, что эта функция на каждом месторождении уникальна, определение величины $R(t)$ (производительность карьера) можно осуществить лишь в итеративном режиме, для чего необходимо:

- 1) Вычислить значение $C_{зав}$.
- 2) Задаться рядом возможных значений полной мощности завода Q_{fmax} .
- 3) Для каждого из этих значений найти график развития горного комплекса, обеспечивающий возможно долгое снабжение завода потоком руды $R = Q_{fmax}$ с содержанием не ниже $C_{зав}$.
- 4) Выбрать оптимальное значение Q_{fmax} по критерию (3) и соответствующее ему оптимальное значение $R_{опт}$.

Расчет графика отработки карьера производится исходя из различной годовой производительности по руде (25, 30, 35, 45, 55 и 66 млн т). При составлении графика отработки максимальная скорость понижения принята равной 45 м в год.

Проведенные расчеты показали, что кумулятивный дисконтированный денежный поток (NPV) достигает максимума при годовой производительности 35 млн т руды в год (рис. 1). При этом время отработки месторождения составляет 53 года, годовой объем горной массы в первой и последней трети срока отработки не превышает 20 млн м³ (во второй колеблется от 22 до 29).

Предложенная методика анализа и оптимизации системы «карьер – завод» может быть использована для технико-экономической оценки крупных горно-металлургических предприятий сходного типа.

Полученные результаты показали, что реальное развитие горно-перерабатывающего комплекса на базе месторождения Мурунтау проводилось не по лучшему сценарию. Естест-

венно, трудно ожидать, что сорок лет назад, не имея данного опыта и средств обработки данных, можно было рассчитывать на оптимальное решение вопроса, связанного с выбором мощностей добывающего и перерабатывающе-

го комплексов. Тем не менее, полагаем, что ретроспективный анализ данной проблемы имеет важное значение для разработки эффективного сценария освоения месторождений, подобных Мурунтау.

Коротко об авторах

Мальгин О.Н. – кандидат технических наук, зам. главного инженера НГМК.

Сытенков В.Н. – доктор технических наук, главный инженер Центрального рудоуправления НГМК.

