

О.В. ГРАЧЕВ,

В.Ф. ПОЖИДАЕВ, д-р техн. наук

(Украина, Луганск, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля)

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Одной из основных задач при разработке систем оптимизации функционирования комплекса процессов обогащения является определение эффективности от реализации схемы углеобогатительной фабрики. Решение данной задачи невозможно без восстановления информации об исходном сырье и аналитических моделей процессов разделения. В связи с большой трудоемкостью выполнения ситового и фракционного анализов, обычно на фабриках их выполняют в ограниченных объемах. Поэтому необходимо восстановление недостающей информации.

Аналитические методы восстановления ситового и фракционного составов рядового угля, разработаны в [1, 2]. Аналитические модели процессов разделения должны основываться на моделировании процессов массопереноса [3].

Для эффективного управления качеством продуктов обогащения необходимо разработать аналитический метод расчета результатов разделения. На основе исходных данных о ситовом и фракционном составах рядового угля, характеристик аппаратов и технологической схемы ОФ с учетом требований к качеству продуктов обогащения необходимо определить оптимальные значения зольности каждого процесса обогащения, обеспечивающие максимизацию функции цели.

Восстановление информации о ситовом и фракционном составе производится согласно [4]. Корректировка ситового и фракционного составов рядовых углей каждой шахты-поставщика производится при изменении текущей зольности в результате засорения его сопутствующими породными фракциями.

Корректировка показателей ситового и фракционного составов ведется при допущении, что причиной изменения зольности являются колебания содержания породы, распределения по классам крупности пропорционально количеству имеющихся в каждом классе минеральных примесей. При увеличении зольности исходного угля в него попадает дополнительно $\Delta_{n1} = \frac{100(A_2^d - A_1^d)}{A_n^d - A_1^d}$, а при уменьшении зольности ее избыток составляет $\Delta_{n2} = \frac{100(A_1^d - A_2^d)}{A_n^d - A_2^d}$, где A_1^d , A_2^d – первоначальная зольность рядового угля до и после засорения (снижения содержания породы); A_n^d – зольность породы.

Дополнительное количество породы, приведшее к увеличению зольности

$$\omega_i = \frac{100(A_{\text{тек}}^d - A_{\text{исх}}^d)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=N+1}^P \gamma_{in} A_{in}^d} \bigg/ \sum_{i=1}^N \sum_{j=N+1}^P \gamma_{in} - A_{\text{исх}}^d.$$

Выход фракции без учета дополнительного засорения породой $\gamma^{(+)(-)} = 100 - \omega_i$.

Выход j -ой фракции i -го класса без учета засорения породой $\gamma_{ij} = \frac{\gamma_{in} \cdot \gamma}{100}$.

Промежуточный выход и зольности i -ых классов

$$\gamma'_i = \frac{\gamma_i \cdot \gamma^{(+)(-)}}{100}; A_i^{d'} = \left(\sum_{j=1}^N \gamma_{ij} A_{ij} + \sum_{j=N+1}^P \gamma_{ij} A_{ij} \right) / \gamma_i \cdot \gamma_j = \sum_{j=1}^N \gamma_{ij}; A'_j = \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} A_{ij} / \gamma'_j;$$

$$\gamma_{ijn} = \sum_{j=1}^N \gamma'_{inj}; A'_{jn} = \sum_{j=1}^N \gamma_{ijn} A_{ijn} / \gamma_{nj}.$$

Промежуточный выход и зольность без учета избыточной породы

$$\gamma'_k = \sum_{j=1}^N \gamma_j + \sum_{j=N+1}^P \gamma'_{jn}; A^{d'} = \left(\sum_{j=1}^N \gamma_j A_j + \sum_{j=N+1}^P \gamma_{jn} A_{jn} \right) (k'k)^{-1}.$$

Количество породных фракций, приходящейся на каждый i -ый класс

$$\omega_i = \sum_{j=N+1}^P \gamma_{in} \omega_k \bigg/ \sum_{i=1}^N \sum_{j=N+1}^P \gamma_{in}.$$

Скорректированный выход породных фракций с учетом дополнительного засорения породой $\gamma'_{ijn} = \sum_{j=N+1}^P \gamma'_{jn} + \omega_i$.

Скорректированные выход и зольность каждой породной фракции в i -ом классе с учетом дополнительного засорения породой $\gamma''_{ijn} = \gamma''_{ijn} \cdot \gamma'_{ijn} \bigg/ \sum_{j=N+1}^P \gamma_{ijn}; A'_{ijn} = A'_{ijn}$.

Скорректированные выход и зольность j -ой фракции i -го класса $\gamma''_{ij} = \gamma'_{in}; A''_{ij} = A'_{ij}$.

Скорректированные выход и зольность i -х классов

$$\gamma''_i = \sum_{j=1}^N \gamma'_{ij} + \sum_{j=N+1}^P \gamma_j; A''_i = \left(\sum_{j=1}^N \gamma''_{ij} A''_{ij} + \sum_{j=N+1}^P \gamma_{ji} A''_{jn} \right) / \gamma''_i;$$

Автоматизация та управління процесами збагачення

Скорректированные выход и зольность j -ой фракции и j_n -й породной фракции

$$\gamma_j'' = \sum_{j=1}^N \gamma_j'' A_{ij}'' / \sum_{j=1}^N \gamma_j''; A_{ijn} = \left(\sum_{j=1}^N \gamma_{ijn}'' A_{ijn}'' / \gamma_{jn}'' \right); \gamma_{in} = \sum_{j=1}^N \gamma_{ijn}''; A_{ij}'' = \left(\sum_{j=1}^N \gamma_j'' A_{ijn}'' / \sum_{j=1}^N \gamma_j'' \right).$$

Скорректированные текущая зольность и выход концентрата

$$\gamma_k'' = \sum_{j=1}^N \gamma_j'' + \sum_{j=N+1}^P \gamma_{jn}''; A_k' = \sum_{j=1}^N \gamma_j'' A_j'' + \sum_{j=N+1}^P \gamma_{jn}'' A_{jn}'' / \gamma_k''.$$

Расчет ситового и фракционного составов шихты рядовых углей производится на основе данных восстановления ситового и фракционного составов шахт-поставщиков и долевого участия этих шахт в шихте.

Количество угля данной шахты в шихте определяется по формуле $G_{ijk}' = \frac{G_{ijk} q_k}{100}$, где G_{ijk}' – количество угля в шихте; G_{ijk} – количество угля k -ой шахты, i -го класса и j -ой фракции. Общее количество и зольность угля всех шахтогрупп i -го класса и j -ой фракции в шихте $G_{ij} = \sum_{k=1}^F G_{ijk}'$;

$A_{ij}^d = \left(\sum_{k=1}^F G_{ijk} A_{ijk}'' \right) / G_{ij}$, где F – количество шахтогрупп.

При обогащении неизбежно образуется шлам с размерами частиц $< 0,5$ мм, в результате чего изменяется выход, зольность и фракционный состав каждого машинного класса.

С целью учета процесса шламообразования определяются: выход ($\Delta_{\text{шл}}$) и зольность A_{Δ}^d шлама от классов $> 0,5$ мм исходного угля на операциях мокрой классификации, транспортирования по желобам до обогащательных аппаратов и в процессах обогащения; выход и зольность дополнительно образующегося шлама из крупного ($\Delta_{\text{шлкр}}$, $A_{\Delta\text{кр}}^d$) и мелкого ($\Delta_{\text{шлм}}$, $A_{\Delta\text{м}}^d$) машинных классов в отдельности.

Показатели $\Delta_{\text{шл}}$ и A_{Δ}^d определяются как разность между выходами и зольными массами шлама крупностью $< 0,5$ мм на выходе фабрики (составляет сумму шлама, переработанного флотацией, присаженного к какому-либо продукту и направленного в отстойники) и класса $< 0,5$ мм в шихте рядовых углей

$\Delta\gamma_{\text{шл}} = \gamma_{\text{шл}<0,5} - \gamma_{<0,5}$; $A_{\Delta}^d = \frac{\gamma_{\text{шл}<0,5} A_{\text{шл}<0,5}^d - \gamma_{<0,5} A_{<0,5}^d}{\Delta\gamma_{\text{шл}}}$, где $\Delta\gamma_{\text{шл}}$, A_{Δ}^d – количество

вновь образованного шлама и его зольность; $\gamma_{\text{шл}<0,5}$, $A_{\text{шл}<0,5}^d$ – количество шла-

Автоматизация та управління процесами збагачення

мов на виході фабрики і його зольність; $\gamma_{<0,5}$ – кількість шламу в шихте рядового угля; $A_{<0,5}^d$ – зольність класу $< 0,5$ мм в исходному углі.

Вихід шламов, образуючихся от крупного і мелкого машинних класов, вычисляется как величина, пропорциональная выходу этих класов:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\text{шлкр}} &= \Delta_{\text{шл}} \cdot \gamma_{\text{кр}} / (\gamma_{\text{кр}} + \gamma_{\text{м}}); \\ \Delta_{\text{шлм}} &= \Delta_{\text{шл}} \cdot \gamma_{\text{м}} / (\gamma_{\text{кр}} + \gamma_{\text{м}}). \end{aligned} \right\}$$

Аналогічно определяється зольність шламов:

$$\left. \begin{aligned} A_{\Delta\text{кр}}^d &= A_{\Delta}^d \cdot A_{\text{кр}}^d / A_{(\text{кр+м})}^d; \\ A_{\Delta\text{м}}^d &= A_{\Delta}^d \cdot A_{\text{м}}^d / A_{(\text{кр+м})}^d, \end{aligned} \right\}$$

где $A_{(\text{кр+м})}^d$ – средневзвешенная зольность крупного і мелкого машинных класов, обогащаемых гравитационными методами.

Количество образующего шлама от фракций различной плотности и $\Delta_{\text{фр}}$ (пропорциональные части) в крупном і мелком машинных классах угля и величина дополнительного роста или снижения шламообразования от тяжелой фракции U по сравнению с пропорциональной частью этой фракции из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \text{При } A_{\Delta\text{кл}}^d > A_{\text{кл}}^d; \quad U &= \Delta_{\text{кл}} (A_{\Delta\text{кл}}^d - A_{\text{кл}}^d) \cdot (A_{\text{т}}^d - A_{\text{кл}}^d)^{-1}; \quad \Delta_{\text{фр}} = \gamma_{\text{фр}} (\Delta_{\text{кл}} - U) \gamma_{\text{кл}}^{-1}; \quad \text{при} \\ A_{\Delta\text{кл}}^d < A_{\text{кл}}^d; \quad U &= \Delta_{\text{кл}} (A_{\text{кл}}^d - A_{\Delta\text{кл}}^d) \cdot (A_{\text{т}}^d - A_{\text{кл}}^d)^{-1}; \quad \Delta_{\text{фр}} = \gamma_{\text{фр}} (\Delta_{\text{кл}} - U) \gamma_{\text{кл}}^{-1}. \end{aligned}$$

После вычисления показателей шламообразования по каждой фракции производится корректировка результатов фракционного анализа всех машинных классов исходного угля.

Корректировка по классам крупности угля $> 0,5$ мм заключается в вычитании из каждой фракции той ее части, которая переходит в шлам (при этом зольность фракций не изменяется), а по классу $< 0,5$ мм – в прибавлении к фракциям этого класса соответствующих частей шлама из более крупных классов с их зольностью, т. е. По классам $+ 0,5$ мм: $\gamma'_{\text{л}} = \gamma_{\text{л}} - \Delta_{\text{л}}$; $\gamma'_{\text{с}} = \gamma_{\text{с}} - \Delta_{\text{с}}$; $\gamma'_{\text{т}} = \gamma_{\text{т}} - (\Delta_{\text{т}} \pm U)$; по классу $- 0,5$ мм: $\gamma'_{\text{л}} = \gamma_{\text{л}} + \Sigma \Delta_{\text{л}}$; $\gamma'_{\text{с}} = \gamma_{\text{с}} + \Sigma \Delta_{\text{с}}$; $\gamma'_{\text{т}} = \gamma_{\text{т}} + \Sigma (\Delta_{\text{т}} \pm U)$.

Знак Σ означает суммирование по машинным классам крупностью $> 0,5$ мм.

Затем определяется средневзвешенная зольность каждого класса и проверяется зольность всего исходного угля, которая должна быть равна ее первоначальной зольности.

Для расчета ожидаемых расчетов обогащения угля использована математическая модель обогащения в тяжелых средах и отсадки, основанная на уравнении збагачення корисних копалин, 2010. – Вип. 41(82) – 42(83)

Автоматизация та управління процесами збагачення

неннях масопереноса. С учетом технологической схемы обогатительной фабрики [5] определяются нормативные отклонения плотности элементарной фракции от граничной плотности разделения:

Для породного отклонения: $t_{j11} = k_{11}(\rho_j - \rho_{p1}) + a_{11}$ при $\rho_j \leq \rho_{p1} + 100$;
 $t_{j12} = k_{12}(\rho_j - \rho_{p1}) + a_{12}$ при $\rho_j > \rho_{p1} + 100$; для промпродуктового отделения:
 $t_{j21} = k_{21}(\rho_j - \rho_{p2}) + a_{21}$ при $\rho_j \leq \rho_{p2} + 100$; $t_{j22} = k_{22}(\rho_j - \rho_{p2}) + a_{22}$ при $\rho_j > \rho_{p2} + 100$; где параметры k и a определяют угол наклона прямой нормированных отклонений и характеризуют величину извлечения отдельных фракций угля в продукты разделения; ρ_j – плотность элементарной фракции исходного угля; ρ_{p1} , ρ_{p2} – плотность разделения угля в обогатительном аппарате соответственно в породном и промпродуктовом отделениях.

Начальные значения коэффициентов четкости разделения ("k" и "a") по данным фабрики-аналога, обогащающей такие же угли в идентичных типах обогатительных аппаратах.

При заданных начальных значениях "k" и "a" и плотностях разделения ρ_1 и ρ_2 по математической модели обогатительного процесса рассчитываются потери полезных компонентов угля с продуктами обогащения:

1) потери концентратных и промпродуктовых фракций угля с породой в породном отделении обогатительного аппарата;

2) потери концентральных фракций угля с промпродуктом.

Рассчитанные значения потерь полезных компонентов сравниваются со значениями этих потерь, установленных на данной обогатительной фабрике.

Параметры моделей процессов разделения находятся по экспериментальным данным о кривых извлечения.

Доля рассматриваемой фракции, извлекаемой [6] в тот продукт, который выделяется первым на данной операции.

Следуя идеям, заложенным в кривых извлечения Тромпа и исходя из решения уравнения Фоккера-Планка, в качестве кривой извлечения можно пред-

ложить: $E = 1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right)$. Однако, поскольку идеальное извлечение ($E=1$) не-

возможно встретить на практике, логично ввести некий поправочный коэффициент E_{\max} , представляющий собой максимальное извлечение экспериментальных данных. Например, в процессах классификации на крутонаклонных грохотах в подрешетный продукт (класс -6 мм) извлечение тонких классов (-0,5 мм) практически никогда не будет равно 100%. Аналогичная картина наблюдается и для

основных процессов обогащения. Тогда $E = E_{\max} \left(1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right)\right)$.

Параметр E_{\max} определяет максимально возможное извлечение, допустимое на данном аппарате или в данном процессе. При известном значении E_{\max}

находим относительную величину извлечения $\tilde{E} = \frac{E}{E_{\max}} = 1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right)$. При $x = m$

Автоматизация та управління процесами збагачення

$\tilde{E} = 0,5$. Таким образом $x = m$ соответствует приблизительно граничной крупности или плотности разделения. Третий параметр s связан с интенсивностью падения извлечения вблизи точки $x = m$.

Для предварительной оценки параметра s продифференцируем полученное выражение:

$$\frac{dE}{dx} = -\varphi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right) \cdot \frac{E_{\max}}{sx} = -\frac{1}{sx} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right)^2}.$$

В точке $x = m$ $-\frac{dE}{dx}\Big|_{x=m} = \frac{1}{sm} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = k$, где k – модуль тангенса угла наклона кривой. Отсюда $s = \frac{1}{km\sqrt{2\pi}}$.

Для подбора начальных значений для параметров m , k , s при $E_{\max} \approx 1$, и соответственно $E \approx \tilde{E}$ можно предложить следующую схему: пусть x_1 и x_2 таковы, что $E_1 = E(x_1)$ ближайшее к $E = 0,5$ справа, а $E_2 = E(x_2)$ ближайшее к $E = 0,5$ слева, тогда $m = \frac{x_1 + x_2}{2}$, $k = \left| \frac{E_2 - E_1}{x_2 - x_1} \right|$, $s = \frac{1}{km\sqrt{2\pi}}$. Если E_{\max} существенно меньше 1, то для подбора параметров можно использовать эту же схему, только в выражении для k вместо E надо подставлять \tilde{E} .

Умножая E на соответствующие значения выхода фракций в исходном угле γ_{in} , определяется содержание этой фракции в каждом продукте. Зольность элементарной j -й фракции A_j^d продукта тяжелосредней сепарации равна зольности этой же фракции в исходном угле A_{jn}^d .

В отсадочной машине зольность самой легкой фракции в породе породного отделения принимается $A_{jпор}^d = 1,2A_{jn}^d$, а в смеси концентрата с промпродуктом (миксте) $A_{jм}^d = \left(1,2 - 0,2 \frac{\gamma_{jм}}{\gamma_{jn}}\right) A_{jn}^d$.

Зольность самой тяжелой фракции в породе $A_{jпор}^d = \left(0,98 + 0,02 \frac{\gamma_{jk}}{\gamma_{jпор}}\right) A_{jn}^d$, а

в миксте $A_{jм}^d = 0,98A_{jn}^d$.

Зольность остальных элементарных фракций породы равна зольности одноименных фракций исходного угля отсадочной машины.

В промпродуктовом отделении отсадочной машины зольность самой легкой фракции в промпродукте равна $A_{jпр}^d = 1,08A_{jм}^d$, а зольность этой же фракции

Автоматизація та управління процесами збагачення

в концентрате $A_{jk}^d = \left(1,08 - 0,08 \frac{\gamma_{jm}}{\gamma_{jk}} \right) A_{jm}^d$.

Соответственно зольность самой тяжелой фракции в концентрате $A_{jn.k}^d = 0,88 A_{jm}^d$.

Выход продуктов обогащения отсадкой и тяжелосредной сепарацией определяется как сумма соответствующих произведений $\gamma_{prod} = \sum_{j=1}^n P_j \gamma_{jn}$, где n – число фракций исходного угля.

Зольность этого же продукта определяется как средневзвешенная величина: $A_{prod}^d = \sum_j P_j \gamma_{jn} A_j / \gamma_{пор}$.

Количество и качество продуктов обогащения флотацией определяется по уравнениям материального баланса.

Выход концентрата $\gamma_{фк} = (A_{фх}^d - A_{уф}^d) / (A_{фх}^d - A_{фк}^d)$; $\gamma_{фх} = \gamma_{кф} - \gamma_{фк}$, где $A_{фк}^d$, $A_{фх}^d$ – средняя зольность соответственно флотоконцентрата и отходов по данным фабрики; $A_{уф}^d$, $\gamma_{уф}$ – соответственно зольность и выход класса 0-0,5 мм шихты рядовых углей, скорректированные на шламообразование.

Система управления качеством продуктов разделения с помощью расчета ожидаемых показателей обогащения заключается в определении таких режимных параметров процессов, которые обеспечивают максимум функции цели – прибыли от реализации товарной продукции при заданных ограничениях на зольности концентрата и промпродукта. С этой целью необходимо на математической модели технологического процесса провести численные эксперименты, из совокупности результатов которых выбирается вариант комбинации технологических параметров отдельных процессов.

Таким образом, предлагаемый аналитический метод позволяет решить задачу управления качеством продуктов разделения, используя как априорную восстановленную информацию о рядовом угле, технологических результатах сепарации. Предлагаемый метод характеризуется возможностью задавать управляющее воздействие до получения экспериментальных результатов, что приводит к уменьшению потерь полезного продукта с отходами и сокращению эксплуатационных затрат.

Список литературы

1. Пожидаев В.Ф., Грачев О.В. Вывод закона распределения размеров частиц как случайной величины для различных классов крупности // Праці Луганського відділення МАІ. – 2002. – № 1(4). – С. 72-75.
2. Пожидаев В.Ф., Грачев О.В. Вид весовой функции распределения плотности и зольности угля по фракциям // Науковці – підприємствам і установам регіону: Зб. наук. праць СНУ ім. В. Даля. – 2002. – Ч.2 – С. 35.
3. Гарус В.К., Грачев О.В., Пожидаев В.Ф., Полулях О.Д. Формализация результатов

Автоматизація та управління процесами збагачення

разделительных процессов в углеобогащении: Монография. – Луганск: изд. ООО "НВФ"Стек", 2003. – 176 с.

4. **Меллер Э.Ф.** Теория исследования каменных углей на обогатимость. – Харьков: ОНТИ, 1935. – 115 с.

5. Оценка экономической эффективности технологии обогащения углей / **В.Ф. Пожидаев, О.В. Грачев, Н.М. Крамарь и др.** // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2009. – Ч.2, № 1(131). – С. 76-80.

6. **Пожидаев В.Ф., Грачев О.В., Тарасенко С.А.** Информационная модель схемы углеобогащительной фабрики // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 26(67). – С. 216-218.

© Грачев О.В., Пожидаев В.Ф., 2010

Надійшла до редколегії 24.03.2010 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом