© П.И. Пилов, И.И. Чумаченко, 2007

УДК 622.7

П.И. Пилов, И.И. Чумаченко

ОПЕРАТИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ В УГЛЕОБОГАЩЕНИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕМЫ РЕЙНХАРДТА

Семинар № 25

При обогащении каменных углей и антрацитов актуальной является задача выбора технологических режимов, обеспечивающих максимальный выход концентрата с заданной зольностью.

Решение этой задачи обеспечивается составлением шихты, формируемой из рядовых углей, поступающих из различных шахт и добычных участков и выбором граничной плотности при раздельном гравитационном обогащении каждого машинного класса, т.е. класса крупности, выделенного из шихты путем грохочения.

Фракционные составы машинных классов различаются как по содержанию фракций плотности, так и по зольности, что осложняет задачу поиска технологического режима, обеспечивающего максимальный выход суммарного концентрата.

При произвольном выборе значений граничной плотности (плотности разделения) из каждого машинного класса можно получать концентраты, соединение которых даст суммарный концентрат с заданной зольностью, но его выход не будет максимальным.

В соответствии с теоремой Рейнхардта [1] (правилом максимального выхода) максимальный выход суммарного концентрата с заданной зольностью при раздельном обогащении каменных углей или машинных классов, полученных из шихты, достигается при одинаковой зольности элементарных слоев границы разделения.

Для использования теоремы Рейнхардта применяется графоаналитический метод, сущность которого состоит в следующем. Для каждого машинного класса и суммарного класса производится построение кривых обогатимости в соответствии с ГОСТ 4990-80.

Исходя из теоретической зольности суммарного концентрата, с помощью кривых обогатимости определяется зольность элементарной фракции, что соответствует границе разделения для всех машинных классов.

Теоретическая зольность суммарного концентрата должна быть ниже требуемой на величину, определяемую согласно ГОСТ 4990-80 категорией обогатимости, зависящей от содержания промежуточных фракций плотностью 1400-1800 кг/м^3 в беспородной массе угля.

Используя найденную величину элементарной зольности, с помощью кривых обогатимости для каждого машинного класса определяются соответствующие плотности разделения, при которых достигается максимальный выход концентрата при заданной его зольности.

Очевидными недостатками такого метода является его трудоемкость и низкая точность определения плотно-

стей разделения из-за использования графического метода.

Трудоемкость метода является существенным препятствием для его оперативного применения. А необходимость в этом становится все более актуальной, поскольку реальная шихта, поступающая в технологический процесс углеобогащения, по сути, является ситуативной. Ее гранулометрический и фракционный составы определяются долевыми участиями углей, поступающих с шахт-постав-щиков и с добычных участков. При этом наблюдается высокая динамика изменения объемов поставляемых углей и их качества, что связано как с графиком ведения горных работ, так и с графиком транспортных поставок, а также с наличием усреднительных устройств на обогатительной фабрике и их мощностью. Из изложенного следует необходимость в постоянном технологическом менеджменте и выполнении расчетов по корректировке технологического режима по нескольку раз в сутки.

При использовании существующих методик и техники опробования, до начала процесса переработки поступившего угля экспресс-оценка его качества сводится лишь к определению зольности, влажности и, в отдельных случаях, гранулометрического состава, что является недостаточным для эффективного технологического менеджмента. Более точное опробование требует значительных материальных издержек и времени, что в условиях динамики поступления сырья на обогатительную фабрику неприемлемо, т.к. информация, полученная в результате опробования, поступает уже после обогащения данной партии сырья.

Современные информационные технологии и вычислительная техника позволяют в короткое время производить большой объем расчетов и позволяют решить изложенные выше проблемы, сократить потери угля с отходами обогатительных фабрик, выбирать режимы, позволяющие при переработке данного сырья получать максимально возможную в данных условиях прибыль.

Стандартные кривые обогатимости каменного угля включают графики функций:

- суммарного выхода фракций с плотностью менее рассматриваемой от зольности элементарных фракций $\gamma\left(A_e^d\right)$ - кривая элементарных фракций;
- суммарного выхода фракций от их зольности $\gamma\left(A_k^d\right)$ - кривая концентрата;
- суммарного выхода фракций от максимальной плотности $\gamma(\delta)$ - кривая плотностей;
- суммарного выхода фракций с плотностью более рассматриваемой от их зольности $\gamma_n\left(A_n^d\right)$ - кривая породы.

Сопоставление функций $\gamma\left(A_e^d\right)$ и $\gamma(\delta)$ приводит к выводу о наличии взаимосвязи $A_e^d(\delta)$. Эта зависимость известна [2] и имеет линейных характер.

Зольность фракций различна – для угля она равна внутренней зольности, обусловленной минерализацией угольного вещества. Иначе эта зольность называется материнской и колеблется в пределах 3–15 %. Зольность промежуточных фракций составляет 25-45 % и определяется степенью насыщенности угля примесями вмещающих пород и продуктов их деструкции. Зольность сростков зависит от доли компонентов в них и их зольности и, в принципе может колебаться от зольности чистых угольных фракций до зольности породы. Зольность угольной породы колеблется

в довольно широких пределах: от 70 до 92 % и обусловлена степенью ее насыщения органическими веществами контактирующих с нею угольных пачек.

Внутренняя зольность зависит от соотношения органической массы углей и минеральных примесей, имеющих зольность $A^d_{орг}$, $A^d_{мин}$ и плотность $\delta_{орг}$, $\delta_{мин}$. Принимая долю органической массы во фракции плотности φ, составим уравнение баланса и для средневзвешенной плотности фракции, приходим к системе уравнений:

$$\left.\begin{aligned} A^d_e &= \varphi A^d_{орг} + (1-\varphi) A^d_{мин} \\ \delta &= \varphi \delta_{орг} + (1-\varphi)\delta_{мин} \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Ее решение дает теоретическую зависимость зольности элементарной фракции от ее плотности:

$$A^d_e = \frac{A^d_{мин} - A^d_{орг}}{\delta_{мин} - \delta_{орг}}\delta + A^d_{орг}. \qquad (2)$$

Действительная плотность компонентов каменных углей и их примесей зависит от условий углефикации и степени метаморфизма. Анализ данных [2] показывает, что определение таких показателей, как зольность и плотность органической массы для конкретного угля в процессе его переработки на обогатительной фабрике, затруднительно. Что касается плотности минеральных примесей, то следует учитывать то, что они имеют иной состав, чем те, которые содержатся в угольной породе. Довольно сложный состав угольной породы вызывает большие затруднения при определении ее средней плотности.

Однако для установления зависимости зольности элементарных фракций от их плотности можно использовать информацию, имеющуюся во фракционных составах, выполняемых в соответствии со стандартом.

При этом следует учитывать, что при производстве фракционного анализа определяется средняя зольность фракции, плотность которой изменяется в пределах δ_{i-1}-δ_i. К тому же плотность фракций фактически является кажущейся, поскольку уголь имеет определенную пористость.

В теоретической зависимости, приведенной выше имеет место отношение плотности фракции к разности плотности минеральных примесей и органической массы, поэтому поправки, определяющие переход от кажущейся плотности к истинной сокращаются.

Для подтверждения высказанных предположений определены зависимости зольности элементарных фракций от их плотности по данным фракционных составов углей из различных лав шахты «Красноармейская Западная №1» (нумерация лав условная) и приведены в табл.1.

Исходя из линейной зависимости зольности элементарных фракций от плотности $A^d_e(\delta)$, угловой коэффициент $k = \frac{A^d_{мин} - A^d_{орг}}{\delta_{мин} - \delta_{орг}}$ в уравнении (2), может быть определен для любого участка. Поэтому при расчете зависимостей (табл. 1) учитывался диапазон, включающий только угольные и промежуточные фракции, поскольку для породных фракций точно определить среднюю зольность затруднительно.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, подтверждает линейную зависимость зольности элементарных

Таблица 1

Определение зависимости зольности фракций каменного угля, добываемого шахтой «Красноармейская Западная №1», от их плотности

Класс +13 мм	Класс 1-13 мм	Класс +1 мм
Зависимость зольности фракций A^d, % от их плотности δ, г/см^3 и достоверность аппроксимации R^2		
Лава 1		
$A^d = 95{,}604\delta - 111{,}44$	$A^d = 93{,}807\delta - 108{,}62$	$A^d = 93{,}807\delta - 108{,}62$
$R^2 = 0{,}9906$	$R^2 = 0{,}9934$	$R^2 = 0{,}9934$
Лава 2		
$A^d = 91{,}962\delta - 113{,}03$	$A^d = 76{,}499\delta - 91{,}95$	$A^d = 76{,}499\delta - 91{,}95$
$R^2 = 0{,}9822$	$R^2 = 0{,}9806$	$R^2 = 0{,}9806$
Лава 3		
$A^d = 90{,}913\delta - 109{,}27$	$A^d = 85{,}82\delta - 102{,}52$	$A^d = 88{,}553\delta - 106{,}11$
$R^2 = 0{,}9932$	$R^2 = 0{,}9909$	$R^2 = 0{,}9926$
Лава 4		
$A^d = 88{,}545\delta - 104{,}36$	$A^d = 88{,}133\delta - 103{,}81$	$A^d = 88{,}368\delta - 104{,}14$
$R^2 = 0{,}997$	$R^2 = 0{,}9985$	$R^2 = 0{,}9978$
Лава 5		
$A^d = 83{,}265\delta - 95{,}971$	$A^d = 81{,}48\delta - 92{,}748$	$A^d = 82{,}449\delta - 94{,}429$
$R^2 = 0{,}987$	$R^2 = 0{,}9818$	$R^2 = 0{,}9864$
Лава 6		
$A^d = 87{,}066\delta - 101{,}81$	$A^d = 86{,}006\delta - 100{,}29$	$A^d = 86{,}855\delta - 101{,}53$
$R^2 = 0{,}9876$	$R^2 = 0{,}9965$	$R^2 = 0{,}9923$
Лава 7		
$A^d = 83{,}79\delta - 101{,}57$	$A^d = 80{,}773\delta - 94{,}207$	$A^d = 85{,}558\delta - 102{,}82$
$R^2 = 0{,}9795$	$R^2 = 0{,}9739$	$R^2 = 0{,}977$
Лава 8		
$A^d = 66{,}086\delta - 78{,}036$	$A^d = 72{,}009\delta - 83{,}601$	$A^d = 70{,}307\delta - 82{,}298$
$R^2 = 0{,}9947$	$R^2 = 0{,}9783$	$R^2 = 0{,}9847$
Лава 9		
$A^d = 90{,}428\delta - 105{,}93$	$A^d = 84{,}074\delta - 95{,}884$	$A^d = 87{,}42\delta - 101{,}29$
$R^2 = 0{,}9722$	$R^2 = 0{,}9739$	$R^2 = 0{,}9744$

фракций от их плотности и показывает тесную корреляционную связь этих параметров.

Учитывая изложенное, уравнение (2) может быть представлено в виде:

$$A_e^d = k\left(\delta - \delta_{\min}\right) + A_{\min}^d, \qquad (3)$$

где $k = \dfrac{A_{\max}^d - A_{\min}^d}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}$; $A_{\max}^d, A_{\min}^d$ - максимальная зольность промежуточной фракции и минимальная зольность угольной фракции; $\delta_{\max}, \delta_{\min}$ - их плотность.

Из формулы (3) следует зависимость плотности элементарной фракции от ее плотности:

$$\delta = \frac{A_e^d - A_{\min}^d}{k} + \delta_{\min}. \qquad (4)$$

Таким образом, задача определения технологического режима сводится к определению плотности разделения для каждого машинного класса с помощью формулы (4). Однако для этого необходимо знать зольность элементарной фракции разделения, которая может быть рассчитана по формуле (3) если знать плотность разделения, при которой из суммарного машинного класса получается концентрат с заданной зольностью. Эту плотность нетрудно отыскать при использовании кусочно-линейной аппроксимации функций $\gamma\left(A_k^d\right)$ (кривой концентрата) и $\gamma\left(\delta\right)$ (кривой плотности):

$$\delta_k = \frac{A_k^d - A_{i-1}^d}{A_i^d - A_{i-1}^d}\left(\delta_i - \delta_{i-1}\right) + \delta_{i-1}, \qquad (5)$$

где A_k^d, A_{i-1}^d, A_i^d, соответственно, теоретическая зольность концентрата и зольности, соответствующие плотности δ_{i-1} начала отрезка кривой $\gamma\left(A_k^d\right)$ и его конца δ_i, в пределах которого находится теоретическая зольность концентрата.

Для пояснения применения предложенной методики определения технологического режима углеобогащения, основанной на теореме Рейнхардта, рассмотрим следующий пример.

Пусть задан фракционный состав машинных классов (табл. 2). В колонке 1 показан диапазон изменения плотности фракций, в колонке 2 – средняя плотность фракций, как среднее арифметическое значений диапазона. Для фракции плотностью <1,3 кг/дм^3 минимальное значение плотности принято для угля марки «Г», т.е. 1,23 кг/дм^3, максимальная плотность породных фракций соответствует 2,6 кг/дм^3. Выхода фракций плотности γ_i указаны от шихты.

Примем теоретическую зольность суммарного концентрата 7,5 %. Из табл. 2 (колонка 10) следует, что плотность разделения для его получения находится в пределах 1,5-1,6 кг/дм^3. Поэтому для суммарного класса в соответствии с формулой (5) при этом она составит:

$$\delta_k = \frac{7,5 - 6,84}{7,99 - 6,84}\left(1,6 - 1,5\right) + 1,5 =$$

$$= 1,457 \ кг/дм^3.$$

Для суммарного и каждого машинного класса находим коэффициенты в уравнении (3) зависимости зольности элементарных фракций от их плотности:

- для суммарного класса при подстановке максимальной и минимальной зольности беспородной массы из колонки 8 и средних значений плотности соответствующих этим зольностям фракций из колонки 2

$$k = \frac{A_{\max}^d - A_{\min}^d}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} = \frac{38,78 - 5,81}{1,7 - 1,27} = 76,67;$$

Таблица 2

Фракционный состав машинных классов каменного угля

Плотность фракций, кг/дм³	$\overline{\delta}$, **кг/дм³**	**Класс +13 мм**		**Класс 0,5-13 мм**		**Суммарный класс**		**Суммарно для вплывших фракций**	
		γ, **%**	A^d, **%**	γ, **%**	A^d, **%**	γ, **%**	A^d, **%**	γ, **%**	A^d, **%**
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<1,3	1,27	5,47	3,6	41,35	6,1	46,82	5,81	46,82	5,81
1,3-1,4	1,35	2,71	9,9	7,32	12,3	10,03	11,65	56,85	6,84
1,4-1,5	1,45	2,59	18,9	2,93	20,7	5,52	19,86	62,37	7,99
1,5-1,6	1,55	0,69	27,1	1,39	29,4	2,08	28,64	64,45	8,66
1,6-1,8	1,7	0,95	35,2	1,41	41,2	2,36	38,78	66,81	9,72
>1,8	2,2	7,11	69,3	16,70	82,2	23,81	78,35	90,62	27,75
Итого		19,52	32,80	71,10	26,37	90,62	27,75		
Шлам		9,38	33,7						
Всего		100	28,31						

- для класса при подстановке максимальной и минимальной зольности беспородной массы из колонки 4 +13 мм

$$k = \frac{35,2 - 3,6}{1,7 - 1,27} = 73,49;$$

для класса 0,5-13 мм при подстановке максимальной и минимальной зольности беспородной массы из колонки 6

$$k = \frac{41,2 - 6,1}{1,7 - 1,27} = 81,63.$$

С помощью формулы (3) находим зольность элементарной фракции разделения:

$$A_e^d = 73,49 \cdot (1,457 - 1,27) + 5,81 = 20,18.$$

Подстановка полученного значения в формулу (4) при соответствующих значениях минимальной зольности угольных фракций и коэффициента k для каждого из машинных классов, получаем плотности разделения, обеспечивающие максимальное значение выхода суммарного концентрата с зольностью 7,5 %:

- для класса +13 мм

$$\delta = \frac{20,18 - 3,6}{73,49} + 1,27 = 1,496 \ кг/м^3;$$

- для класса 0,5-13 мм

$$\delta = \frac{20,18 - 6,1}{81,63} + 1,27 = 1,442 \ кг/м^3.$$

Таким образом, определение технологического режима осуществлено с помощью нетрудоемкого расчета без построения кривых обогатимости. Преимущество предложенной методики состоит в существенном сокращении времени, что дает возможность более эффективно осуществлять технологический менеджмент, базируясь на информации о гранулометрических и фракционных составах углей шахт-поставщиков рядового угля и объемах его поступления. При этом отпадает необходимость в обязательном измерении зольности исходного угля, поскольку для расчета рационального технологического режима достаточно знать информацию о зольности и содержании беспородных фракций, распределение которых является специфичным для угля в независимости от объема присечки вмещающих пород при добыче.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюшин С.П.* Проектирование углеобогатительных фабрик. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1974, 200 с.

2. *Справочник* по обогащению углей. Под ред. И.С. Благова, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. 2-е изд., перераб. И доп. М.: Недра, 1984, 614 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Пилов Петр Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых, первый проректор Национального горного университета, г. Днепропетровск,

Чумаченко Игорь Иванович – директор ЦОФ «Чумаковская», г. Донецк.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 25 симпозиума «Неделя горняка-2006». Рецензент проф. *В.А. Горбатов.*