

Мессбауэровские спектры окатышей Качканарского ГОКа:  
а – исходный окатыш; б – восстановленный окатыш

системе расчета, приведенной работах [4, 6]. Особенностью данного способа является возможность в случае присутствия силикатов в образце определять как степень восстановления железа общего, так и отдельно железорудной составляющей с одновременным опреде-

**Результаты мессбауэровской спектроскопии  
исходного и восстановленного окатышей  
и относительное содержание в них кислорода фазы**

| Установленные в окатышах фазы  | Коэффициент пересчета кислорода в оксидах по Fe (K) | Исходный окатыш |               | Восстановленный окатыш |               |
|--------------------------------|---|-----------------|---------------|------------------------|---------------|
|                                |   | отн. % Fe-фазы  | отн. % O-фазы | отн. % Fe-фазы         | отн. % O-фазы |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,430   | 91,7            | 39,4          | 9,5                    | 4,1           |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 0,382   | 8,3             | 3,1           | 28,8                   | 11,0          |
| FeO                            | 0,286   | –               | –             | 2,8                    | 0,6           |
| Fe <sub>мет</sub>              | –   | –               | –             | 59,5                   | –             |
| Σ                              | –   | 100,0           | 42,5          | 100,0                  | 15,7          |

ление степени металлизации продуктов восстановления. Определение степени восстановления по данным мессбауэровской спектроскопии обладает наглядностью результата и простотой расчета.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Металлургия чугуна*. Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвистнев и др./ Под ред. Ю.С. Юсфина – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
2. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. *Металлургия железа*. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
3. Линчевский Б.В. *Техника металлургического эксперимента*. – М.: Металлургия, 1992. – 240 с.
4. ГОСТ 28657-90. *Руды железные. Метод определения восстановимости*. – М.: Издательство стандартов, 1990.
5. Вегман Е.Ф., Литвиненко Ю.А., Пыриков А.Н. *Подготовка руд к плавке. Лабораторный практикум*. – М.: МИСиС, 1983. – 75 с.
6. ГОСТ 28658-90. *Руды железные. Метод определения относительной восстановимости*. – М.: Издательство стандартов, 1990.
7. Коровушкин В.В. *ЯГР-спектроскопия в практике геолого-минералогических работ*. – М.: АО «Геоинформмарк», 1993. – 39 с.

© 2012 г. В.В. Коровушкин, А.В. Смагина,  
Г.С. Подгородецкий  
Поступила 23 ноября 2011 г.

УДК 669+519.2

**В.П. Малышев<sup>1</sup>, С.Ш. Кажикенова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева  
<sup>2</sup>Карагандинский государственный университет

**СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ  
ПУТЕМ РАФИНИРОВАНИЯ ЧУГУНА**

Классическая идеология рационального использования сырья, сформулированная академиками Ферсманом А.Б., Вернадским В.И., Бардиным И.П., заключающаяся в реализации принципа процесс для сырья (а не

превалирующий долгое время в металлургии сырье к процессам) предопределяет создание не единой, а нескольких технологий переработки природного и техногенного сырья. Для оценки конкурентной способности

создаваемых процессов в МИСиСе и ИМЕТе предложены критерии, с помощью которых может производиться оценка технологий посредством подсчета ее рейтинга. К таковым критериям относятся показатель безотходности, коэффициент использования горной массы, критерий абсолютной безотходности, уровень комплексной переработки сырья, материальный, стоимостной, энергоемкостные показатели безотходности и ряд других. Однако теоретические основы единой методики оценки создаваемых и существующих технологий и процессов, позволяющей учитывать влияние индивидуальных критериев друг на друга, их синергизм еще не разработаны. Авторами разработан метод анализа химико-металлургических процессов с единой количественной сравнительной оценкой их синергетического совершенства на основе фундаментального закона сохранения суммы информации и энтропии, так как совершенствование технологических процессов с учетом комплексного по составу сырья невозможно на основе только традиционных методов вскрытия причинно-следственных связей в процессах общей технологической схемы с анализом их материальных и тепловых балансов. Возможен также дополнительный анализ этих процессов на основе информационной энтропии Шеннона с целью объединения разрозненных до сих пор показателей по извлечению ценных компонентов и их содержанию в промпродуктах по переделам и в целом по технологической схеме с последующим применением этого метода для анализа и сравнительной оценки химико-металлургических производств.

С целью проведения сравнительного анализа конкурирующих схем или отдельно усовершенствуемых операций по единому обобщенному критерию комплексной завершенности, а также неопределенности, рассмотрим применение формулы Шеннона для определения информационного баланса производственных процессов с помощью показателей извлечения и содержания железа [1]:

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – вероятность обнаружения какого-либо однородного элемента системы в их множестве  $N$ ;  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ ,  $p_i \geq 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Для конкретного численного выражения степени детерминации и стохастичности рассмотрим формулу Р. Хартли, которая применительно к уровневой имеет вид:

$$H_{n(\max)} = k^n \log N_0. \quad (2)$$

Рассмотрим технологическую схему с длиной кода  $k = 2$ , т.е.  $k$  в данном случае это выборка из множества (элемент и не элемент), содержащихся в продукте. Технологический смысл этого ограничения сводится к

тому, что детерминация системы в первом приближении оценивается по одному какому-то элементу, главному и целевому, а остальные принимаются в каждом переделе как единый остаток, т.е. не элемент. Тогда (2) примет вид:

$$H_{n(\max)} = 2^n \log N_0 = 2^n \log_2 2 = 2^n.$$

Авторами предложена идеальная иерархическая модель [2], разработаны информационные критерии комплексной оценки неопределенности и завершенности технологических процессов и применены для анализа существующих или усовершенствуемых производств черных и цветных металлов в Казахстане. В табл. 1 приведены расчетные показатели уровневой (дифференцированной) и системной (интегральной) детерминации абстрактной технологической системы. В качестве характеристики вероятности обнаружения главного элемента системы можно принять его содержание, выраженное в долях единицы, например, это содержание железа в соответствующих продуктах.

То же самое относится и к процессу извлечения элемента в тот или иной продукт, так как в этом случае показатель извлечения тождествен вероятности перехода данного элемента из одного состояния системы в другое. Тогда применительно к единственному контролируемому элементу системы обычные математические расчеты для выражения информационной неопределенности становятся более краткими и сводятся к следующему. Если  $p$  – вероятность обнаружения в продукте или перехода при извлечении контролируемого элемента, то неопределенность или неожиданность каждого из этих событий равна обратной величине от его определенной идентификации, т.е.  $1/p$ . В данном варианте оценки неопределенности поведения только одного элемента системы эта неопределенность выразится следующей формулой:

$$H = \log_2 \frac{1}{p} = -\log_2 p = -\frac{\ln p}{\ln 2}. \quad (3)$$

Определим качество технологических переделов и переделных продуктов на основании сравнительного анализа конкурирующих схем по единому обобщенному критерию комплексной неопределенности и завершенности технологической схемы производства стали путем рафинирования чугуна. Поскольку извлечение любого компонента пропорционально его содержанию в исходном веществе и обратно пропорционально содержанию в продукте, то в первом приближении извлечение железа из земной коры в рудное месторождение можно оценить по соотношению

$$\beta_0 \cong \frac{\alpha_{з.к.}}{\alpha_{п.м.}} 100 \%,$$

Расчетные оптимальные энтропийно-информационные характеристики в иерархической системе для случая  $k = 2, N_0 = 2$

| $n$ | $I_n(d)$ ,<br>бит/эл.                     | $H_{n(\max)}$ ,<br>бит/эл. | $d_n = \frac{I_n(d)}{H_{n(\max)}}$    | $I_{\sum_n}(d)$ ,<br>бит/эл.                           | $H_{\sum_n(\max)}$ ,<br>бит/эл. | $d_{\sum_n} = \frac{I_{\sum_n}(d)}{H_{\sum_n(\max)}}$                           |
|-----|---|----------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------|---|
| $n$ | $2^n \left[ 1 - \frac{1}{(n+1)!} \right]$ | $2^n$                      | $\left[ 1 - \frac{1}{(n+1)!} \right]$ | $\sum_{i=0}^n 2^i \left[ 1 - \frac{1}{(i+1)!} \right]$ | $\sum_{i=0}^n 2^i$              | $\frac{\sum_{i=0}^n 2^i \left[ 1 - \frac{1}{(i+1)!} \right]}{\sum_{i=0}^n 2^i}$ |
| 0   | 0   | 1,0                        | 0                                     | 0  | 1,0                             | 0   |
| 1   | 1,0000                                    | 2,0                        | 0,5000                                | 1,0000   | 3,0                             | 0,3333  |
| 2   | 3,3333                                    | 4,0                        | 0,8333                                | 4,3333   | 7,0                             | 0,6190  |
| 3   | 7,6667                                    | 8,0                        | 0,9583                                | 12,0000  | 15,0                            | 0,8000  |
| 4   | 15,8667                                   | 16,0                       | 0,9917                                | 27,8667  | 31,0                            | 0,8989  |
| 5   | 31,9556                                   | 32,0                       | 0,9986                                | 59,8222  | 63,0                            | 0,9496  |
| 6   | 63,9873                                   | 64,0                       | 0,9998                                | 123,8095   | 127,0                           | 0,9749  |
| 7   | 127,9968                                  | 128,0                      | 1,0000                                | 251,8063   | 255,0                           | 0,9875  |
| 8   | 255,9993                                  | 256,0                      | 1,0000                                | 507,8056   | 511,0                           | 0,9937  |
| 9   | 511,9999                                  | 512,0                      | 1,0000                                | 1019,8055  | 1023,0                          | 0,9969  |
| 10  | 1024,0000                                 | 1024,0                     | 1,0000                                | 2043,8055  | 2047,0                          | 0,9984  |

где  $\beta_0$  – показатель извлечения на нулевом уровне схемы,  $\alpha_{з.к.}$  – показатель содержания в земной коре,  $\alpha_{р.м.}$  – показатель содержания в рудном месторождении.

Так как для железа  $\alpha_{з.к.} = 5,1 \%$  [3], а в балансовой руде в среднем  $\alpha_{р.м.} \cong 50,0 \%$ , то

$$\beta_0 \cong \frac{\alpha_{з.к.}}{\alpha_{р.м.}} 100 \% = \frac{5,1}{50,0} 100 \% = 10,2 \%$$

На основании информационной формулы Шеннона (1) проведем энтропийно-информационный анализ каждого технологического передела для расчета комплексной неопределенности и завершенности технологической схемы в целом на примере производства стали. Для оценки комплексной неопределенности  $H_k$  на основе аддитивных свойств энтропии находим этот показатель как сумму вкладов неопределенности как по извлечению и содержанию

$$H_k = \sum_{i=0}^n H_i, \text{ бит/эл.}, \quad (4)$$

так и по переделам технологической схемы, представленным в справочной литературе. Получив характеристику комплексной неопределенности технологической схемы  $H_k$ , можно с помощью обращенной формулы [4]

$$p_k = \exp(-H_k \ln 2) = 2^{-H_k}, \text{ доли единицы (д.е.)} \quad (5)$$

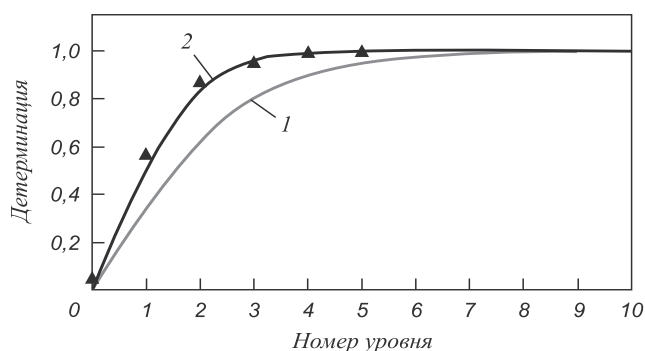
найти соответствующую ей характеристику комплексной определенности технологической схемы производства стали.

Здесь впервые показатели содержания и извлечения используются объединено как единые оценки детерминации технологического передела и для схемы в целом. Следует подчеркнуть, что данная величина  $p_k$ , будучи рассчитанной через информационную характеристику  $H_k$ , учитывает ценность каждого добавленного процента или его доли не аддитивно, а синергетически. Тем самым комплексная определенность технологической схемы  $p_k$  также является информационной оценкой системы технологических операций. Результаты сравнительных расчетов по переделам и в целом по технологической схеме производства стали путем рафинирования чугуна представлены в табл. 2. Сопоставление расчетных данных по предлагаемой идеальной модели (см. табл. 1) с практическими данными (см. табл. 2) проиллюстрировано графически в координатах  $n, d$  в соответствии с рисунком.

В сравнении справочных данных по извлечению и содержанию целевого компонента технологической организации производства стали путем рафинирования чугуна (см. табл. 2) с идеальной моделью (см. табл. 1) выявляется адекватная корреляция ( $R = 0,847942$ ,  $t_R = 6,035314 > 2$ ) для системной детерминации, гораздо выше для уровневой детерминации ( $R = 0,991408$ ,  $t_R = 115,8812 > 2$ ). Более тесная корреляция с дифференцированной моделью свидетельствует о более де-

**Информационная оценка по извлечению и содержанию технологических переделов производства стали путем рафинирования чугуна**

| Технологические переделы | Показатели содержания $\alpha$ |                    | Показатели извлечения $\beta$ |                   | $H_{\alpha\beta}$ | $P_{\alpha\beta}$      |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
|                          | $\alpha$                       | $H_{\alpha}$ , бит | $\beta$                       | $H_{\beta}$ , бит |                   |                        |
| Добыча                   | 0,5000                         | 1,0000             | 0,1020                        | 3,2934            | 4,2934            | 0,0510                 |
| Обогащение               | 0,6550                         | 0,6104             | 0,8700                        | 0,2009            | 0,8113            | 0,5696                 |
| Доменная плавка          | 0,8830                         | 0,1795             | 0,9910                        | 0,0130            | 0,1925            | 0,8751                 |
| Плавка                   | 0,9550                         | 0,664              | 0,9980                        | 0,0029            | 0,0693            | 0,9531                 |
| Переплав                 | 0,9950                         | 0,0072             | 0,9990                        | 0,0014            | 0,0086            | 0,9940                 |
| Рафинирование            | 0,9999                         | 0,0001             | 0,9999                        | 0,0001            | 0,0002            | 0,9998                 |
| $H_k$ , бит              | –                              | 1,8636             | –                             | 3,5117            | 5,3753            | –                      |
| $P_k$ , д.е.             | 0,2748                         | –                  | 0,0877                        | –                 | –                 | $2,4087 \cdot 10^{-2}$ |



Зависимость информационной оценки показателей по извлечению и содержанию от уровня технологической схемы производства стали путем рафинирования чугуна:

1 – системная детерминация; 2 – уровневая детерминация, ▲ – практические данные

переработки металлургического сырья являются альтернативными.

Предложенные авторами расчеты для информационного анализа производства стали путем рафинирования чугуна уже в первом приближении коррелируют с динамикой роста детерминированной составляющей в абстрактной иерархической системе, чем обосновывается целесообразность дальнейшего энтропийно-информационного анализа подобных систем. Таким образом, установлена взаимосвязь между технологическими показателями по извлечению и содержанию железа с вероятностью его перехода и обнаружения на каждом уровне и в целом по технологической схеме производства стали путем рафинирования чугуна на основании анализа энтропийно-информационных характеристик.

тальной разработке каждого передела в черной металлургии, в отличие от производства цветных металлов. Об этом свидетельствует также и то, что в большинстве случаев промежуточные продукты различных переделов реализуются как самостоятельные товарные продукты.

В настоящее время переработка вторичного сырья как в черной, так и цветной металлургии приобрела настолько большие масштабы, что может рассматриваться как самостоятельное техническое и технологическое направление в металлургии. Поэтому условно можно считать, что прямые и вторичные способы пе-

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Shannon C.E. // Bell Systems Tech. J. 1948. Vol. 27. P. 623 – 656.
2. Malyshev V.P., Kazhikenova S.Sh., Turdukozhaeva A. // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2009. Vol. 50. No. 4. P. 335 – 337.
3. Свойства элементов: Справ. изд. – В 2-х кн. Кн. 1 // Под ред. М.Е. Дрица. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2003. – 448 с.
4. Малышев В.П., Оспанов Е.А., Нурмагамбетова А.М., Кажикенова С.Ш. // Промышленность Казахстана. 2008. № 4. С. 52 – 56.

© 2012 г. В.П. Малышев, С.Ш. Кажикенова  
Поступила 27 октября 2011 г.