

МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

Совершенствование технологических процессов производства цветных и черных металлов с учетом беднеющего и комплексного по составу сырья целесообразно проводить не только на основе традиционных методов вскрытия причинно-следственных связей в процессах общей технологической схемы с анализом их материальных и тепловых балансов. Возможен дополнительный анализ этих процессов на основе информационной энтропии Шеннона с целью объединения разрозненных до сих пор показателей по содержанию и извлечению ценных компонентов в технологических продуктах по переделам и в целом по технологической схеме для сравнительного анализа и оценки металлургических процессов. На основании энтропийно-информационного анализа технологических схем черной металлургии разработаны информационные критерии комплексной оценки неопределенности и завершенности технологических схем производства стали.

Ключевые слова: энтропия, информация, металлургический процесс, производство стали, энтропийно-информационный анализ, извлечение.

С учетом беднеющего и комплексного по составу сырья совершенствование технологических процессов производства черных металлов невозможно на основе только анализа их материальных и тепловых балансов. Необходим дополнительный анализ с учетом энтропийно-информационных аспектов для определения баланса между неопределенностью и завершенностью технологических переделов или схемы в целом. Подобное дополнение диктуется тем, что если материальный и тепловой балансы основаны на использовании всеобщих законов сохранения массы и энергии, то последний из всеобщих законов сохранения — закон сохранения суммы информации и энтропии — до сих пор в металлургии не используется.

Для энтропийно-информационного анализа любых объектов широко используется статистическая формула Шеннона [1]

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

где H — энтропийная характеристика; p_i — вероятность обнаружения элементов в их множестве N ; $\sum_{i=1}^N p_i = 1$, $p_i \geq 0$.

До опубликования созданной К. Шенноном теории Р. Хартли предложил определять количество информации по формуле [2]

$$H_{n(\max)} = k^n \log N_0, \quad (1)$$

где n — порядковый номер уровня системы, $n \in Z$,

$n \geq 0$; k — длина кода элементов на каждом уровне; N_0 — число элементов уровня $n = 0$.

Рассмотрим технологическую схему с $k = 2$. Различие дифференциальной и интегральной моделей (табл. 1) проиллюстрируем графически в координатах n, d в соответствии с рис. 1.

В качестве характеристики вероятности обнаружения главного элемента системы можно принять его содержание, выраженное в долях единицы. Например, это содержание извлекаемого химического элемента железа в соответствующих продуктах. То же самое относится и к процессу извлечения элемента в тот или иной продукт. Тогда применительно к единственному контролируруемому 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 поведения только одного элемента системы выразится формулой

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

Определим качество технологических переделов и передельных продуктов на основании сравнительного анализа конкурирующих схем по единому обобщенному критерию комплексной неопределенности и завершенности технологической схемы производства стали в доменных печах и прямым получением железа. Поскольку извлечение любого компонента пропорционально его содержанию в исходном веществе и обратно пропорционально содержанию в продукте, то извлечение железа из зем-



С. Ш. Кажикенова

E-mail: sauleshka555@mail.ru

Таблица 1. Расчетные энтропийно-информационные характеристики технологических переделов в иерархической системе для $k = 2$, $N_0 = 2$

n	$I_n(d)$, бит/эл.*	$H_{n(\max)}$, бит/эл.	$d_n = \frac{I_n(d)}{H_{n(\max)}}$	$I_{\Sigma_n}(d)$, бит/эл.	$H_{\Sigma_n(\max)}$, бит/эл.	$d_{\Sigma_n} = \frac{I_{\Sigma_n}(d)}{H_{\Sigma_n(\max)}}$
	$2^n \left[1 - \frac{1}{(n+1)!} \right]$	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	1,0	251,8063	255,0	0,9875
8	255,9993	256,0	1,0	507,8056	511,0	0,9937
9	511,9999	512,0	1,0	1019,8055	1023,0	0,9969
10	1024,0000	1024,0	1,0	2043,8055	2047,0	0,9984
11	2048,0000	2048,0	1,0	4091,8055	4095,0	0,9992
12	4096,0000	4096,0	1,0	8187,8055	8191,0	0,9996
13	8192,0000	8192,0	1,0	16379,8055	16383,0	0,9998
14	16384,0000	16384,0	1,0	32763,8055	32767,0	0,9999
15	32768,0000	32768,0	1,0	65531,8055	65535,0	1,0
16	65536,0000	65536,0	1,0	131067,8055	131071,0	1,0

* $I_n(d)$ — информационная характеристика (информация) системы на n -м уровне иерархической системы; бит/эл. — единица измерения количества информации и энтропии (размерность бит на элемент).

ной коры в рудное месторождение можно оценить выражением

$$\beta_0 \cong \frac{\alpha_{з.к.}}{\alpha_{р.м.}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где β_0 — показатель извлечения на нулевом уровне технологической 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], $\alpha_{р.м.} \cong 50,0 \%$, то

$$\beta_0 \cong \frac{\alpha_{з.к.}}{\alpha_{р.м.}} \cdot 100 \% = \frac{5,1}{50,0} \cdot 100 \% = 10,2 \%. \quad (4)$$

На основании информационной формулы Шеннона (2) проведем энтропийно-информационный анализ каждого технологического передела и технологической схемы в целом на примере производства стали. 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.

При сравнении справочных данных по извлечению и содержанию целевого компонента по технологии производства стали в доменных печах (табл. 2) с характеристиками новой модели (2) и (5) выявляется адекватная корреляция ($R = 0,847942$, $t_R = 6,035314 > 2$ для системной детерминации, $R = 0,991408$, $t_R = 115,8812 > 2$ для уровневой детерминации). В производстве стали прямым получением железа (табл. 3) также выявляется адекватная корреляция ($R = 0,733544$, $t_R = 3,176112 > 2$ для системной детерминации, $R = 0,96213$, $t_R = 25,89641 > 2$ для уровневой детерминации). Сопоставление расчетных данных по новой модели (2) и (5) с практическими данными показано на рис. 2.

Таким образом, на основании энтропийно-информационного анализа автором настоящей статьи определена более тесная корреляция практических результатов производства черных металлов с дифференцированной моделью идеальной иерархической системы, что свидетельствует о более детальной разработке каждого передела в черной металлургии в отличие от производства цветных металлов. О более основательной проработке каждого передела в черной металлургии свидетельствует также и то, что в

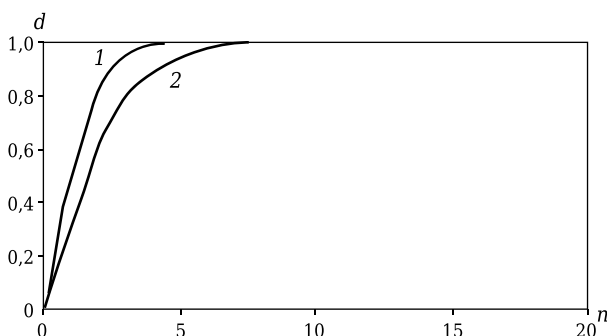


Рис. 1. Зависимость степени детерминации d от уровня n идеальной иерархической системы: 1 — дифференциальная модель; 2 — интегральная модель

Таблица 2. Информационная оценка производства стали в доменных печах

Технологический передел	Показатели содержания α		Показатели извлечения β		$H_{\alpha\beta}$	$p_{\alpha\beta}$
	α	H_{α} , бит	β	H_{β} , 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	0,0664	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	—	—	$2,4087 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3. Информационная оценка производства стали прямым получением железа

Технологический передел	Показатели содержания α		Показатели извлечения β		$H_{\alpha\beta}$	$p_{\alpha\beta}$
	α	H_{α} , бит	β	H_{β} , бит		
Добыча	0,5000	1,0000	0,1020	3,2934	4,2934	0,0510
Обогащение	0,7140	0,4860	0,8920	0,1649	0,6509	0,6368
Металлизация	0,9800	0,0291	0,9950	0,0072	0,0363	0,9751
Плавка	0,9910	0,0130	0,9980	0,0029	0,0159	0,9890
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	—	1,5354	—	3,4699	5,0053	—
p_k , д. е.	0,3449	—	0,0902	—	—	$3,1131 \cdot 10^{-2}$

большинстве случаев промежуточные продукты различных переделов реализуются как самостоятельные товарные продукты между предприятиями отрасли в масштабах как одной страны, так и нескольких государств.

Основная тенденция развития процессов прямого восстановления железа из руды в наши дни определяется расширением объема производства губчатого чистого железа и металлизированной шихты высокого качества, а также интенсификацией его использования для выплавки стали. Но сравнительная оценка на основе энтропийно-информационных характеристик двух альтернативных процессов сталеплавильного производства показывает, что сегодня еще нет сравнимых по мощности с традиционными доменными производствами промышленной технологии и соответствующих агрегатов для активизации такого процесса, что и подтверждается большей близостью доменного производства к идеальной иерархической системе.

Для совершенствования сталеплавильного производства специалисты многих ведущих металлургических компаний мира продолжают разрабатывать экологически безопасные и более дешевые технологии выплавки стали. В последние годы в мировой сталелитейной отрасли идет активный поиск рентабельных технологий, способных заменить традиционный процесс производства стали в доменных печах и кислородных конвертерах. Но, по нашим прогнозам, доменный процесс производства стали будет все же превалировать над любыми иными процессами получения стали. Такова информационная оценка определенности реализации технологических схем, которая может быть использована для сравнения их состояния до и после усовершенствования наряду с базовой характеристикой комплексной неопределенности.

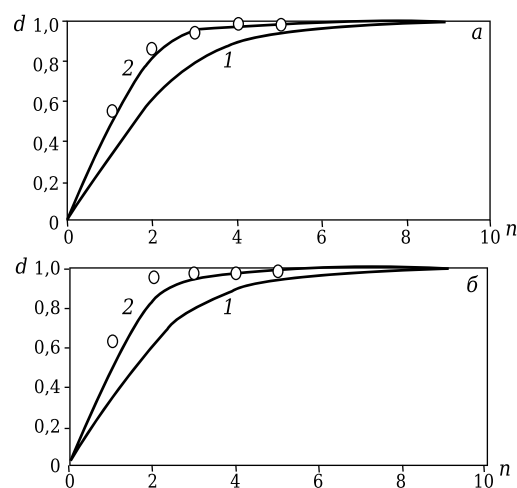


Рис. 2. Зависимость информационной оценки показателей от уровня n технологической схемы производства стали в доменных печах (а) и прямым получением железа (б): 1 — системная детерминация; 2 — уровневая детерминация; точки — практические данные

Библиографический список

1. Shannon, C. E. A mathematical theory of communications / C. E. Shannon // Bell Systems Tech. J. — 1948. — Vol. 27. — P. 623–656.
2. Хартли, Р. Передача информации / Р. Хартли // Теория информации и ее приложения. — М.: ИЛ, 1959. — С. 5–35.
3. Гудима, Н. В. Краткий справочник по металлургии цветных металлов / Н. В. Гудима, Я. П. Шейн. — М.: Металлургия, 1975. — 536 с.
4. Malyshev, V. P. A qualitative and quantitative evaluation of the technological processes in the metallurgy of nonferrous metals / V. P. Malyshev, S. Sh. Kazhikenova, A. Turdukozhayeva // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. — 2009. — Vol. 50, № 4. — P. 335–337. ■

Получено 03.03.16
© С. Ш. Кажикенова, 2016 г.