

УДК 669+519.2

В. П. МАЛЫШЕВ, С. Ш. КАЖИКЕНОВА, А. М. ТУРДУКОЖАЕВА

ОБОСНОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕДЕЛОВ И ПРОДУКТОВ

(Представлена академиком НАН РК А. М. Газалиевым)

Предложена формула для расчета комплексной неопределенности группы анализируемых технологических операций до и после их усовершенствования, а также технологических схем в целом в единицах информации. На основе этой формулы возможен расчет комплексной неопределенности группы анализируемых технологических операций, а также технологических схем в целом, что позволит установить предсказуемость и технологическую надежность этих операций.

Для информационного анализа качества технологических продуктов и процессов их получения количественные оценки смысла и ценности информации могут производиться только после предварительного соглашения о том, что же именно в каждом конкретном случае имеет для рассматриваемых явлений ценность и смысл. Методы исчисления информации, предложенные Шенноном, позволяют выявить соотношение количества предсказуемой (т. е. формируемой по определенным правилам) информации и количества той неожиданной информации, которую нельзя заранее предсказать, а тем самым дать возможность определить качественную и количественную оценку определенной технологической схемы. В качестве вероятности обнаружения главного элемента технологической системы можно принять его содержание в продукте, выраженное в долях единицы. Например, это содержание извлекаемого химического элемента, в рассмотренном нами случае – меди, в продуктах технологического передела. Также за вероятность обнаружения можно взять содержание годной фракции (окатышей, брикетов) в соответствующем продукте. 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. Оба этих показателя – содержание и извлечение могут быть в равной степени использованы для оценки качества продукта или технологических переделов.

Покажем, как оценивается качество технологических продуктов, а вместе с тем и техноло-

гических операций, приводящих к получению этих продуктов, по результатам технологических переделов медеплавильного производства на Жезказганском (ЖГМК) и Балхашском (БГМК) горнometаллургических комбинатах (табл. 1).

Таблица 1. Содержание меди
в продуктах ЖГМК и БГМК

| Передел | Наименование | Содержание | Среднее значение |
|---------------------------------|---------------|-------------|------------------|
| Добыча | Руда | 0,5-1,2% | 0,85% |
| Обогащение | Концентрат | 5,5-40% | 22,75% |
| Плавка | Штейн | 40-55% | 47,5% |
| Конвертирование | Черновая медь | 98,6-98,9% | 98,75% |
| Огневое рафинирование | Анодная медь | 99,2-99,5% | 99,35% |
| Электролитическое рафинирование | Катодная медь | 99,9-99,99% | 99,95% |

Так, содержание меди в руде составляет 0,5-1,2% (в среднем 0,85%), а в концентратах 5,5-40% (в среднем 22,75%). Штейн плавки в жидкой ванне содержит 40-55% (в среднем 47,5%) меди. Основной результат проведенной работы по научному, технологическому и техническому обоснованию процесса конвертирования в конечном итоге сводится к возможности повышения содержания меди в черновом металле. Этот показатель меняется в пределах 98,6-98,9% (в среднем 98,75%). В результате технологического процесса анодной плавки показатели по содержанию меди в анодах следующие 99,2-99,5% (в среднем 99,35%). В процессе электролитического рафинирования показатели по содержанию меди в катодах составляют 99,9-99,99% (в среднем 99,95%).

Для учета различной степени неожиданности (вероятности) событий К. Шенон предложил использовать заимствованную из статистической физики вероятностную функцию энтропии, приведенную к виду [1]:

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

где p_i – вероятность обнаружения какого-либо однородного элемента системы в их множестве N .

Если p – это вероятность обнаружения контролируемого элемента, то неожиданность или неопределенность этого обнаружения равна $1/p$. В нашем варианте оценки эта неопределенность выразится как:

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

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

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

где $N_n = N_0^{k^n}$; n – число уровней; k – длина кода элементов на каждом уровне иерархической системы.

Теорема 1. Пусть N_n – число элементов n -го уровня. I_0 – емкость информации нулевого уровня технологической системы.

Тогда емкость информации n -го уровня в расчете на один элемент выражается формулой:

$$I_n = k^n I_0.$$

В рассматриваемой нами технологической схеме $k = 2$ есть выборка из множества элементов – элемент и не элемент (в нашем случае медь и все остальные элементы в совокупности), тогда уравнение (2) примет вид:

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

На основании теоремы 1 вычислим максимальные информации технологической схемы на начальных 10-ти уровнях при $k = 2$:

| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------|---|---|---|---|----|----|----|-----|-----|-----|------|
| $H_{n(\max)}$ | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 |

бит/эл.

Принципиально важным преимуществом информационной оценки качества продуктов или технологических операций является то, что

предлагаемый показатель H_n , как и любые энтропийно-информационные величины, можно складывать. Данное свойство аддитивности имманентно присуще энтропии и информации и является основой для выражения закона сохранения их суммы. Следовательно, технологическую неопределенность различных операций в пределах единой схемы можно выразить системным показателем неопределенности:

$$H_{\sum n(\max)} = \sum_{i=0}^n H_i = \sum_{i=0}^n 2^i \text{ бит/эл.},$$

или для начальных 10-ти уровней:

| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------|---|---|---|----|----|----|-----|-----|-----|------|------|
| $H_{\sum n(\max)}$ | 1 | 3 | 7 | 15 | 31 | 63 | 127 | 255 | 511 | 1023 | 2047 |

бит/эл.

Теорема 2. Информационная емкость иерархической системы и n -го уровня определяются равенствами:

$$I_{\sum n} = \sum_{i=0}^n \frac{H_{i(\max)}}{(i+1)!} = \log N \sum_{i=0}^n \frac{\prod_{m=0}^i k_m}{(i+1)!},$$

$$I_n = \frac{H_{n(\max)}}{(n+1)!} = \frac{\prod_{m=0}^n k_m \log N}{(n+1)!}, \quad (3)$$

где $H_{n(\max)}$ – максимально возможная энтропия системы.

Детерминированная составляющая информации $I_n(d)$ на основании теоремы 2 определяется равенством:

$$I_n(d) = 2^n \left[1 - \frac{1}{(n+1)!} \right] \text{ бит/эл.},$$

| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|---|---|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|
| $I_n(d)$ | 0 | 1 | 3,33 | 7,67 | 15,9 | 32,0 | 64,0 | 128 | 256 | 512 | 1024 |

бит/эл.

Так как информационная емкость технологической системы определяется по ее стохастической части, то на основании (3) получим:

| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|---|---|--------|--------|--------|--------|
| $I_n(h)$ | 1 | 1 | 0,6667 | 0,3333 | 0,1333 | 0,0444 |

бит/эл.

| n | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|--------|--------|--------|--------|-----|
| $I_n(h)$ | 0,0127 | 0,0032 | 0,0007 | 0,0001 | 0,0 |

бит/эл.

Системная детерминированная составляющая $I_{\sum_n}(d)$ равна:

$$I_{\sum_n}(d) = \sum_{i=0}^n 2^i \left[1 - \frac{1}{(i+1)!} \right] \text{бит/эл.},$$

| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------------|---|---|------|----|------|------|-----|-----|-----|------|------|
| $I_{\sum_n}(d)$ бит/эл. | 0 | 1 | 4,33 | 12 | 27,9 | 59,8 | 124 | 252 | 508 | 1020 | 2044 |

Таблица 2. Расчетные информационно-энтропийные характеристики технологических переделов в иерархической системе для $k = 2$, $N_0 = 2$

| n | $I_n(d)$, бит/эл. | $H_{n(\max)}$, бит/эл. | $d_n = \frac{I_n(d)}{H_{n(\max)}}$ | $I_{\sum_n}(d)$, бит/эл. | $H_{\sum_n(\max)}$, бит/эл. | $d_{\sum_n} = \frac{I_{\sum_n}(d)}{H_{\sum_n(\max)}}$ |
|-----|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|
| 0 | 0 | 1,0 | 0 | 0 | 1,0 | 0 |
| 1 | 1,00 | 2,0 | 0,50 | 1,00 | 3,0 | 0,33 |
| 2 | 3,33 | 4,0 | 0,83 | 4,33 | 7,0 | 0,62 |
| 3 | 7,67 | 8,0 | 0,96 | 12,0 | 15,0 | 0,80 |
| 4 | 15,9 | 16,0 | 0,99 | 27,9 | 31,0 | 0,90 |
| 5 | 32,0 | 32,0 | 1,0 | 59,8 | 63,0 | 0,95 |
| 6 | 64,0 | 64,0 | 1,0 | 124,0 | 127,0 | 0,98 |
| 7 | 128,0 | 128,0 | 1,0 | 252,0 | 255,0 | 0,99 |
| 8 | 256,0 | 256,0 | 1,0 | 508,0 | 511,0 | 0,99 |
| 9 | 512,0 | 512,0 | 1,0 | 1020,0 | 1023,0 | 0,998 |
| 10 | 1024,0 | 1024,0 | 1,0 | 2044,0 | 2047,0 | 0,999 |

Сопоставление этих данных с практическими для технологии производства меди (табл. 1) проиллюстрируем графически в координатах n , d . Коэффициент их корреляции составил 0,8614 при значимости 6,6744, что свидетельствует об адекватности предлагаемой модели информационной оценки качества продуктов в последовательных операциях технологической схемы.

Величина N в данном случае не влияет на решение проблемы, так как она сокращается при вы-

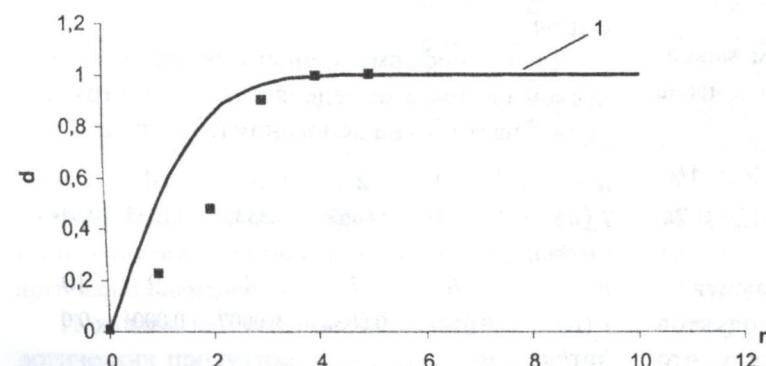
определив степени детерминации и неустранимой стохастичности на каждом уровне технологической системы по формулам [3]:

$$d_n = \frac{I_n(d)}{H_{n(\max)}}, h_n = \frac{I_n(d)}{H_{n(\max)}} = 1 - d,$$

проанализируем полученные результаты проведенных расчетов, которые представлены в табл. 2.

Численном выражении степень детерминации $d_n = \frac{I_n(d)}{H_{n(\max)}}$ и системной детерминации $d_{\sum_n} = \frac{I_{\sum_n}(d)}{H_{\sum_n(\max)}}$.

Влияние длины кода k , то есть учитываемых элементов системы (целевого компонента и основных примесей) может быть выявлено в



Зависимость степени детерминации от уровня: 1 – зависимость по новой модели, точки – экспериментальные данные

дальних исследований. В целом же повышение качества продукта по мере технологической его переработки коррелирует с динамикой роста детерминированной составляющей в абстрактной иерархической системе, чем обосновывается целесообразность дальнейшего энтропийно-информационного анализа подобных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шеннон К.Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963. С. 243-332.
2. Хартли Р. Передача информации / Теория информации и ее приложения. М.: ИЛ, 1959. С. 5-35.

3. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное отображение. Алматы; Караганда: Фылым, 1994. 376 с.

Summary

The work suggests a formula for estimating complex indeterminacy of a group of technological operations undergoing analyses before and after their improvement, as well as technological schemes as a whole in the information units. The formula allows to estimate the complex indeterminacy of a group of technological operations undergoing analyses, as well as technological schemes as a whole, which will result in determining predictability and technological reliability of these operations.

Химико-металлургический
институт им. Ж. Абишева

Поступила 2.10.08г.