

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

ЭНТРОПИЙНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕДЕЛОВ ПО ДИНАМИКЕ ПОВЫШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ИЗВЛЕКАЕМОГО КОМПОНЕНТА

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.

Закон сохранения суммы информации и энтропии (или закон сохранения максимума энтропии), сформулированный в середине XX в., пока что используется только для абстрактного анализа любых сложных систем, но не для конкретных процессов при реализации сложных химико-металлургических схем. Между тем этот закон можно было бы применить для определения баланса между неопределенностью и завершенностью технологических переделов или схемы в целом, то есть для информационного баланса любых производственных процессов. В связи с этим поставим задачу на основе информационной энтропии Шеннона разработать метод 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.

Получение металлической продукции из руд, концентратов или других видов металлосодержащего сырья усложняется тем, что цветная металлургия имеет дело, как правило, со сравнительно бедным, но сложным по составу полиметаллическим сырьем. При переработке таких материалов металлургическими способами необходимо одновременно с получением основного металла обеспечить комплексное выделение всех других ценных компонентов в самостоятельные товарные продукты при высокой степени их извлечения вплоть до создания безотходных технологий.

Авторами [1] на основе анализа существующих энтропийно-информационных закономерностей, доказательства их математической корректности получены расчетные формулы для оценки технологической неопределенности и завершенности каждого передела и схемы в целом.

В основу информационного анализа положено сопоставление структуры самоорганизующейся абстрактной иерархической системы по ее детерминированной, то есть информационной составляющей, с практической детерминацией технологических переделов по качеству промежуточного и конечного продуктов по мере перехода целевого компонента из сырья в товарный вид.

Для энтропийно-информационных характеристик любых объектов широко используется статистическая формула Шеннона [2]:

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

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

Рассмотрим применение данной формулы для оценки неопределенности качества продукта или технологического передела через неопределенность главного элемента системы. В качестве вероятности обнаружения главного элемента технологической системы можно в первом приближении принять его содержание в продукте, выраженное в долях единицы.

До опубликования созданной К. Шенноном теории Р. Хартли предложил определять количество информации по формуле [3]:

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

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

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

$$H_{n(\max)} = 2^n \log N_0 = 2^n \log_2 2 = 2^n. \quad (3)$$

Используя свойство аддитивности энтропии и информации, выразим технологическую неопределенность различных операций в пределах единой технологической схемы системным показателем неопределенности:

$$H_{\sum_{n(\max)}} = \sum_{i=0}^n H_i = \sum_{i=0}^n 2^i, \quad (4)$$

Согласно закону сохранения, количество детерминированной информации рассчитывается как разность между максимально возможной энтропией (неопределенностью) технологической системы $H_{n(\max)}$ и некоторым текущим значением энтропии H_n [4]:

$$I_n(d) = 2^n \left[1 - \frac{1}{(n+1)!} \right], \quad (5)$$

В работе [4] рассчитаны стохастическая $I_n(h)$ и системная детерминированная $I_{\sum_n}(d)$ составляющие технологической системы:

$$I_n(h) = \frac{2^n}{(n+1)!},$$

$$I_{\sum_n}(d) = \sum_{i=0}^n 2^i \left[1 - \frac{1}{(i+1)!} \right]. \quad (6)$$

Определим степени детерминации и неустраняемой стохастичности на каждом уровне технологической системы по формулам:

$$d_n = 1 - \frac{1}{(n+1)!}, \quad h_n = \frac{1}{(n+1)!} \quad (7)$$

Аналогично для системной детерминации и системной неустраняемой стохастичности технологической схемы:

$$d_{\sum_n} = \frac{\sum_{i=0}^n 2^i \left[1 - \frac{1}{(i+1)!} \right]}{\sum_{i=0}^n 2^i}, \quad h_{\sum_n} = 1 - d_{\sum_n}. \quad (8)$$

Результаты расчета по новой модели (3)–(8) информационно-энтропийных характеристик технологических переделов в иерархической системе приведены в табл. 1.

Критерием адекватности для установления наиболее корректной зависимости расчетных данных по новой модели с практическими данными нами использованы коэффициент нелинейной множественной корреляции R и его значимость t_R [5].

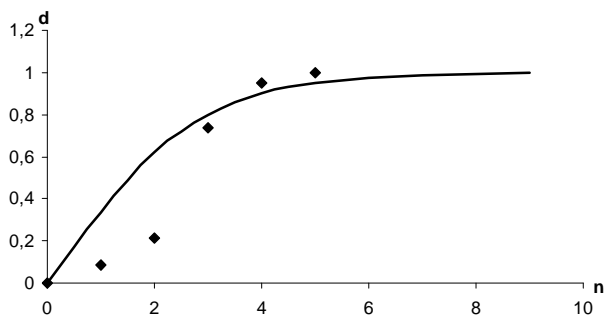
Проведем энтропийно-информационный анализ качества технологических продуктов, а вместе с тем и технологических операций, приводящих к получению этих продуктов, по результатам технологических переделов производства меди [6] в зависимости от способа плавки (табл. 2). Сопоставление расчетных данных по новой модели (табл. 1) с практическими данными технологии производства цветных металлов на примере меди проиллюстрируем графически в координатах n, d в соответствии с рисунком, расположив графики по мере возрастания их корреляционной зависимости.

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

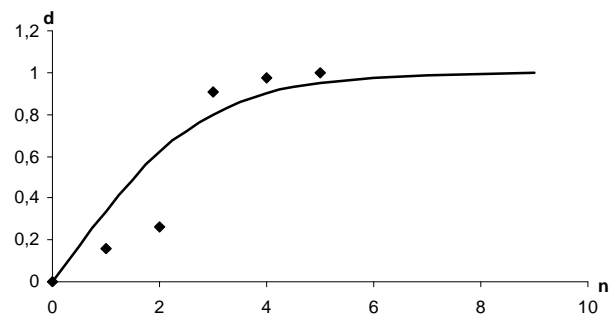
n	$I_n(d)$ бит/эл.	$H_{n(\max)}$ бит/эл.	$d_n = \frac{I_n(d)}{H_{n(\max)}}$	$I_{\sum_n}(d)$ бит/эл.	$H_{\sum_{n(\max)}}$ бит/эл.	$d_{\sum_n} = \frac{I_{\sum_n}(d)}{H_{\sum_{n(\max)}}$
0	0	1,0	0	0	1,0	0
1	1,00	2,0	0,50	1,00	3,0	0,33
2	3,33	4,0	0,83	4,33	7,0	0,62
3	7,67	8,0	0,96	12,0	15,0	0,80
4	15,9	16,0	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

Таблица 2. Извлечение меди в продуктах технологических переделов

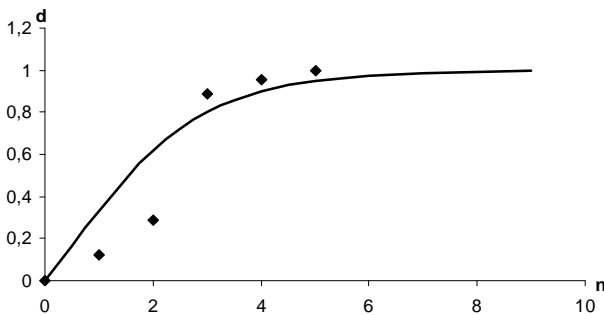
Технология плавки	Извлечение меди на каждом уровне технологической схемы, %											
	Руда		Концентрат		Штейн		Черновая медь		Анодная медь		Катодная медь	
	Cu	Ср. знач.	Cu	Ср. знач.	Cu	Ср. знач.	Cu	Ср. знач.	Cu	Ср. знач.	Cu	Ср. знач.
Отражательная плавка	0,5-2,0	1,25	75,0-90,0	82,50	91,0-98,8	94,9	89,1-96,5	92,80	97,0-99,6	98,30	99,99	99,99
Шахтная плавка:												
медно-серная	1,5-2,5	2,00	78,0-87,4	82,70	90,0-94,5	92,25	90,4-94,6	92,50	95,0-96,4	95,70	99,99	99,99
полупиритная	1,5-2,5	2,00	84,0-90,2	87,10	88,1-90,1	89,10	94,0-96,4	95,20	96,0-96,6	96,30	99,99	99,99
Электроплавка	0,5-1,2	0,85	93,0-97,0	95,00	94,7-98,5	96,60	91,7-98,0	94,35	98,0-99,4	98,70	99,99	99,99
Автогенная:												
плавка в жидкой ванне,	0,5-1,2	0,85	94,0-98,2	96,10	96,4-98,2	97,30	92,0-97,4	94,70	98,0-98,2	98,10	99,99	99,99
плавка во взвешенном состоянии,	0,5-1,2	0,85	91,0-93,3	92,15	95,0-97,5	96,25	90,7-97,0	93,85	98,0-98,5	98,25	99,99	99,99
кислородно-взвешенная плавка,	0,5-1,2	0,85	91,6-98,8	95,20	96,0-98,8	97,40	93,4-95,2	94,30	98,2-98,4	98,30	99,99	99,99
«Оутокумпу»,	0,5-1,2	0,85	96,6-98,8	97,70	98,3-99,1	98,70	91,9-94,5	93,20	98,0-98,8	98,40	99,99	99,99
КИВЦЭТ,	0,5-1,2	0,85	94,5-98,5	96,50	98,0-98,2	98,10	90,3-94,0	92,15	98,0-99,4	98,70	99,99	99,99
«Норанда»,	0,5-1,2	0,85	92-94,6	93,30	96,3-98,6	97,45	91,5-95,0	93,25	98,1-99,2	98,65	99,99	99,99
УОРКРА,	0,5-1,2	0,85	91-94,4	92,70	95,7-98,6	97,15	90,2-95,5	92,85	98,2-99,0	98,60	99,99	99,99
«Мицубиси»	0,5-1,2	0,85	91-93,7	92,35	95,5-98,7	97,10	92,2-94,0	93,10	98,0-99,4	98,70	99,99	99,99



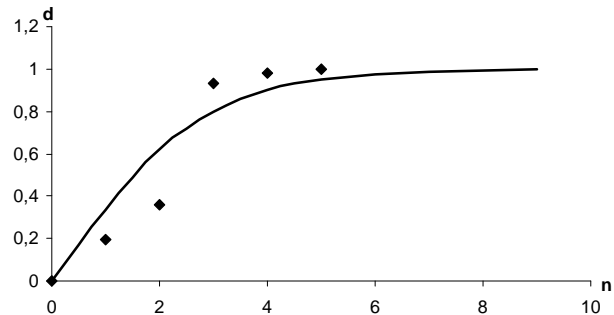
а) медно-серная $R = 0,895542$,
 $t_R = 9,045718$



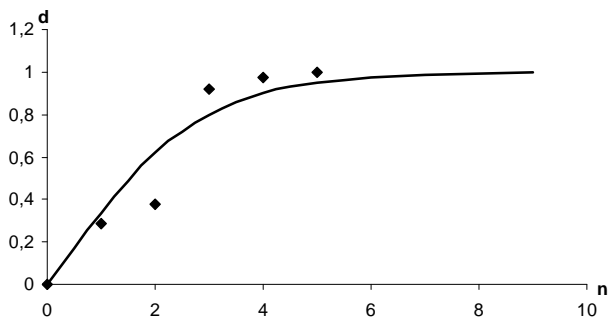
б) отражательная $R = 0,914399$,
 $t_R = 11,15994$



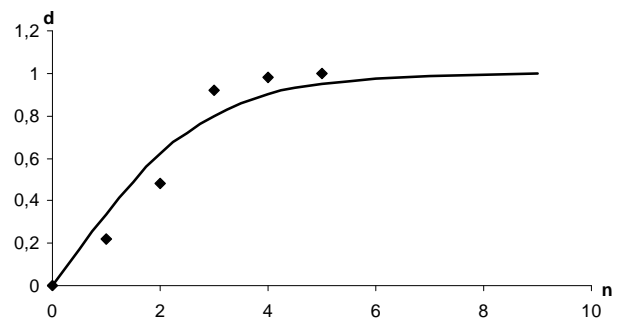
в) полупиритная $R = 0,920845$,
 $t_R = 12,1128$



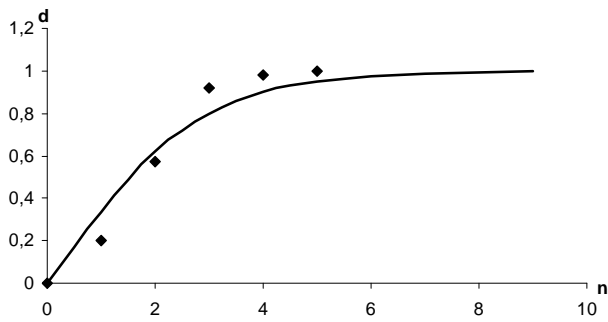
г) электроплавка $R = 0,942072$,
 $t_R = 16,74784$



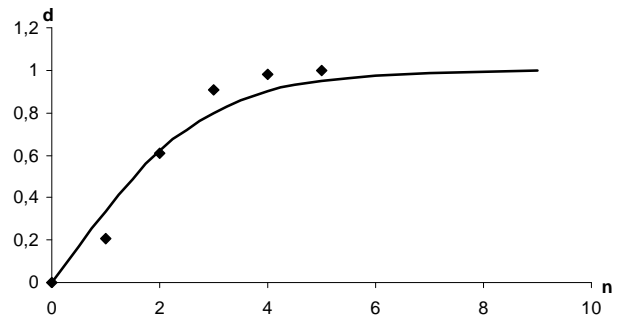
д) КВП $R = 0,951681,$
 $t_R = 20,18353$



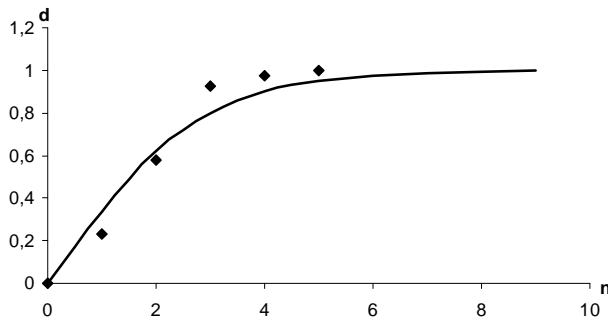
е) Мицубиси $R = 0,968954,$
 $t_R = 31,70251$



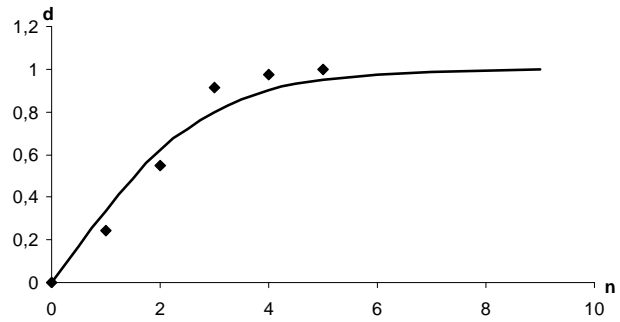
ж) УОРКРА $R = 0,975133,$
 $t_R = 39,70767$



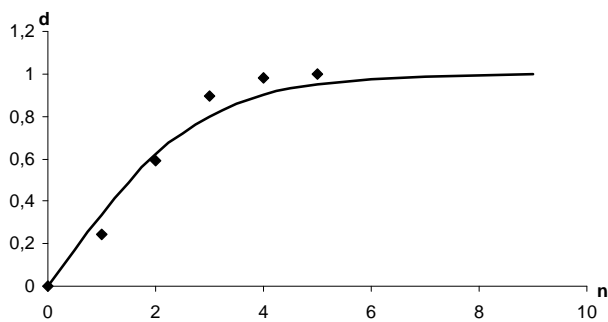
з) Норанда $R = 0,977863,$
 $t_R = 44,6679$



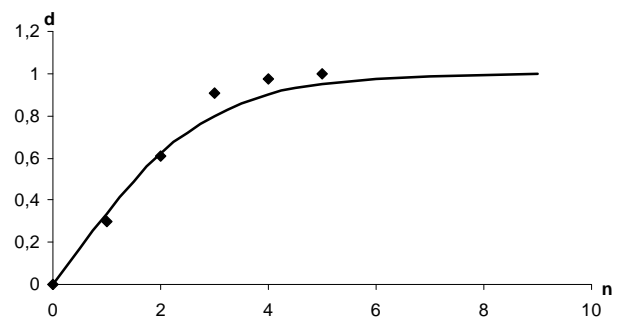
и) ПВЖ $R = 0,978692,$
 $t_R = 46,42508$



к) ПВС $R = 0,979231,$
 $t_R = 47,64267$



л) КИВЦЭТ $R = 0,982618,$



м) Оутокумпу $R = 0,985877,$
 $t_R = 57,01578$

Сравнительная оценка расчетных данных по новой модели с объединенными показателями содержания и извлечения технологических переделов по производству меди

Таблица 3. Сравнительная оценка расчетных данных по новой модели с объединенными показателями содержания и извлечения технологических переделов по производству меди

Технология плавки	Коэффициент корреляции
Медно-серная плавка	$R = 0,895542 \quad t_R = 9,045718$
Отражательная плавка	$R = 0,914399 \quad t_R = 11,15994$
Полупиритная плавка	$R = 0,920845 \quad t_R = 12,1128$
Электроплавка	$R = 0,942072 \quad t_R = 16,74784$
Кислородно-взвешенная плавка	$R = 0,951681 \quad t_R = 20,18353$
Процесс «Мицубиси»	$R = 0,968954 \quad t_R = 31,70251$
Процесс УОРКРА	$R = 0,975133 \quad t_R = 39,70767$
Процесс «Норанда»	$R = 0,977863 \quad t_R = 44,6679$
Плавка в жидкой ванне	$R = 0,978692 \quad t_R = 46,42508$
Плавка во взвешенном состоянии	$R = 0,979231 \quad t_R = 47,64267$
КИВЦЭТ	$R = 0,982618 \quad t_R = 57,01578$
Процесс «Оутокумпу»	$R = 0,985877 \quad t_R = 70,30168$

Тесноту связи справочных (табл. 2) и рассчитанных по новой модели (табл. 1) данных оценим с помощью коэффициента нелинейной множественной корреляции и представим в табл. 3. В сравнении справочных данных по способам плавки медных руд и концентратов на штейн технологической организации производства меди с системной детерминацией новой модели выявляется высокая корреляционная зависимость для автогенных процессов, среди которых ведущее место занимает финская плавка – «Оутокумпу». Наименьшей корреляционной зависимостью с новой моделью связаны шахтная и отражательная плавки, что в действительности указывает на то, что эти способы плавки далеко не удовлетворяют требованиям к современному металлургическому процессу. Основным их недостатком следует считать многостадийность переработки рудного сырья, что приводит к расщеплению ценных компонентов по различным продуктам и полупродуктам технологии. В результате этого они не обеспечивают достаточной комплексности использования перерабатываемого сырья и высокого извлечения из него всех полезных составляющих. Основным направлением развития технологии переработки сульфидного сырья является основание

промышленностью новых, более технологичных и экономичных схем, построенных на базе автогенных процессов.

В результате проведенных исследований сложных технологических систем с точки зрения энтропийно-информационных закономерностей на основе строгих математических доказательств нами предложены расчетные формулы, устанавливающие единый критерий комплексной неопределенности всей системы процессов и связанный с этим критерием показатель комплексной завершенности данных процессов. Оба они непосредственно следуют из информационной энтропии Шеннона, выражаются в единицах информации и устанавливают как индивидуальную, так и комплексную оценку неопределенности и завершенности рассматриваемых химико-металлургических процессов или качества переделных продуктов. На этом основании можно сделать заключение о возможности использования как разработанной нами модели в качестве единых информационных критериев для экспертной оценки конкурирующих схем на стадии выбора альтернативных проектов, так и способов усовершенствования существующих технологий, что особенно важно в условиях рыночных отношений. Внедрение автогенных процессов, основан-

ных на использовании теплоты сгорания сульфидов для технологических нужд, в металлургии меди и других тяжелых цветных металлов дает большой экономический эффект. В металлургии меди, в частности, значительно упрощается технология за счет совмещения процессов обжига, плавки на штейн и частично или полностью (при плавке сразу на черновую медь) процесса конвертирования в одном технологическом цикле или аппарате. Использование автогенных процессов, кроме того, позволяет резко повысить комплексность использования перерабатываемого сырья, исключить расход постороннего топлива, улучшить многие другие технико-экономические показатели.

В целом, как мы наблюдаем из предложенных нами расчетов, повышение качества продукта по мере технологической его переработки уже в первом приближении коррелирует с динамикой роста детерминированной составляющей в абстрактной иерархической системе, чем обосновывается целесообразность дальнейшего энтропийно-информационного анализа подобных систем.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кажикенова С.Ш. Информационные и энтропийные характеристики технологических операций // Материалы международной научно-практической конференции «Комплексная переработка минерального сырья», посвященной 50-летию ХМИ им Ж. Абишева и 15-летию НЦКПМС РК. Караганда, 25–26 сентября 2008. С. 421–424.
2. Шеннон К.Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963. С. 243–332.
3. Хартли Р. Передача информации / Теория информации и ее приложения. М.: ИЛ, 1959. С. 5–35.
4. Малышев В.П., Кажикенова С.Ш., Турдукожаева А.М. Обоснование информационной оценки качества технологических переделов и продуктов // Доклады НАН РК. 2008. № 6. С. 62–65.
5. Малышев В.П. К определению ошибки эксперимента, адекватности и доверительного интервала аппроксимирующих функций // Вестник МОН и НАН РК. 2000. №4. С. 22–30.
6. Гудима Н.В., Шейн Я.П. Краткий справочник по металлургии цветных металлов. М.: Металлургия, 1975. 536 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.

УДК 669+519.2

Карагандинский государственный
технический университет

Поступила 11.03.09г.