

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

ЭНТРОПИЙНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕДЕЛОВ ПО ДИНАМИКЕ ПОВЫШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦЕЛЕВОГО КОМПОНЕНТА

(Представлена академиком НАН РК А.М. Газалиевым)

Предложена формула для расчета комплексной неопределенности группы анализируемых технологических операций, 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 конкрет-

ных 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 металлоконтента 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, в доказательство 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

$$N; \sum_{i=1}^N p_i = 1, \quad p_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

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.Шенном 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 неустойчивой 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 неустойчивой 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 таблице 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 (таб-

лица 2). Сопоставление расчетных данных по новой модели (таблица 1) с практическими данными технологии производства цветных металлов на примере меди проиллюстрируем графически в координатах n, d в соответствии с рисунком 1, расположив графики по мере возрастания их корреляционной зависимости.

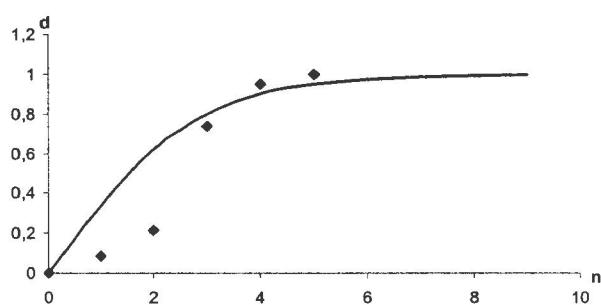
Тесноту связи справочных (таблица 2) и рассчитанных по новой модели (таблица 1) данных оценим с помощью коэффициента нелинейной множественной корреляции и представим в таблице 3. В сравнении справочных данных по способам плавки медных руд и концентратов на штейн технологической организации производства 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 распределению ценных компонентов по различным продуктам и полу продуктам технологии. В результате этого они не обеспечивают достаточной комплексности использования перерабатыва-

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

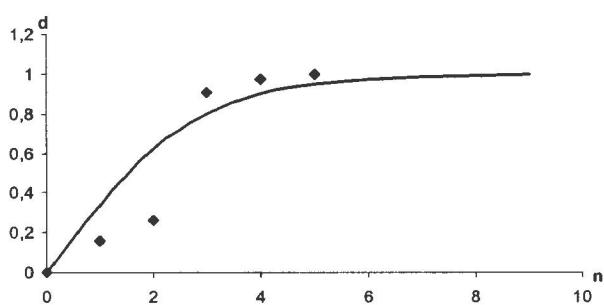
n	$I_n(d)$ бит/эл.	$H_{n(\max)}$ бит/эл.	$d_n = \frac{I_n(d)}{H_{n(\max)}}$	$I_{\sum n}(d)$ бит/эл.	$H_{\sum n(\max)}$ бит/эл.	$d_{\sum n} = \frac{I_{\sum n}(d)}{H_{\sum n(\max)}}$
0	0	1,0	0	0	1,0	0
1	1,00	2,0	0,50	1,00	3,0	0,33
2	3,33	4,0	0,83	4,33	7,0	0,62
3	7,67	8,0	0,96	12,0	15,0	0,80
4	15,9	16,0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

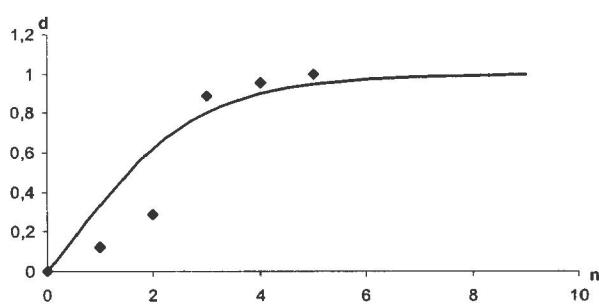
Технология плавки	Извлечение меди на каждом уровне технологической схемы, %											
	Руда		Концентрат		Штейн		Черновая медь		Анодная медь		Катодная медь	
	Cu	Ср. знач.	Cu	Ср.знач.	Cu	Ср.знач.	Cu	Ср.знач.	Cu	Ср.знач.	Cu	Ср.знач.
Отражательная плавка	0,5-2,0	1,25	75,0-90,0	82,50	91,0-98,8	94,9	89,1-96,5	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	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



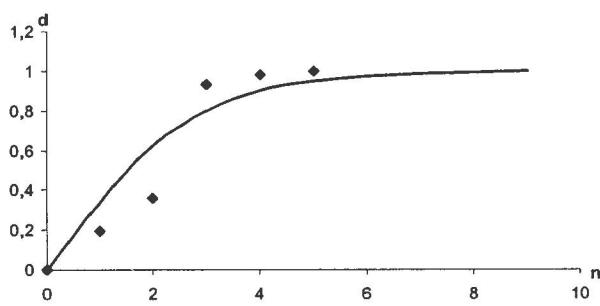
а) медно-серная $R = 0,895542$,
 $t_R = 9,045718$



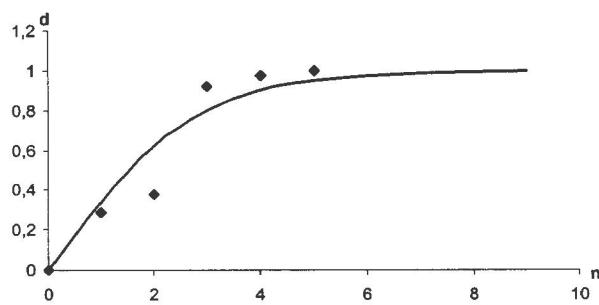
б) отражательная $R = 0,914399$,
 $t_R = 11,15994$



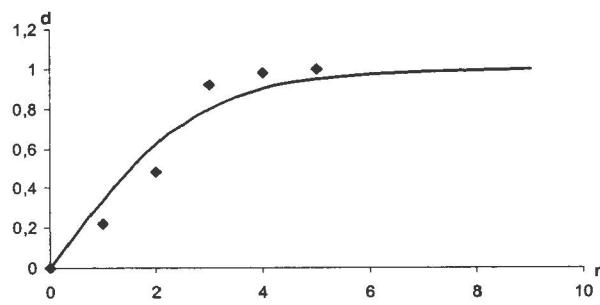
в) полупиритная $R = 0,920845$,
 $t_R = 12,1128$



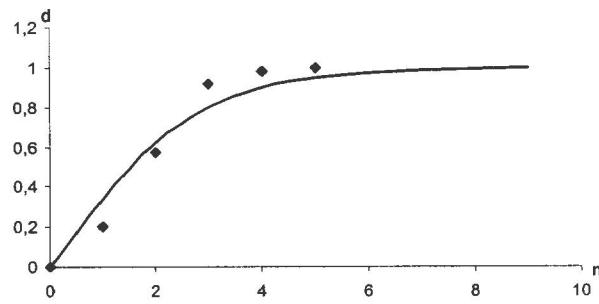
г) электроплавка $R = 0,942072$,
 $t_R = 16,74784$



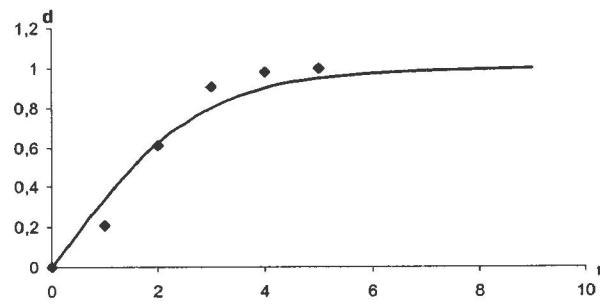
д) КВП $R = 0,951681$,
 $t_R = 20,18353$



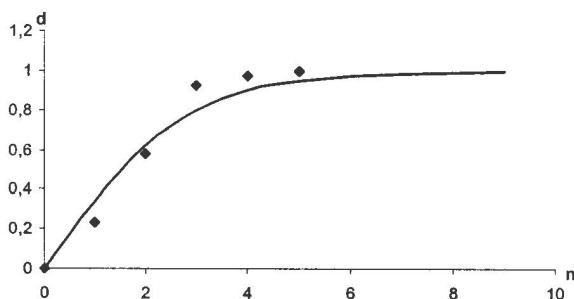
е) Мицубиси $R = 0,968954$,
 $t_R = 31,70251$



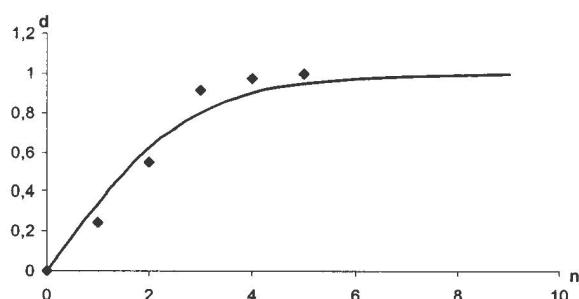
ж) УОРКРА $R = 0,975133$,
 $t_R = 39,70767$



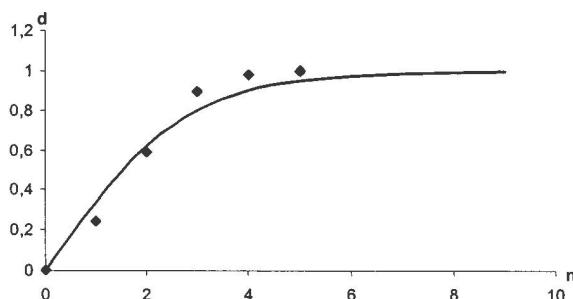
з) Норанда $R = 0,977863$,
 $t_R = 44,6679$



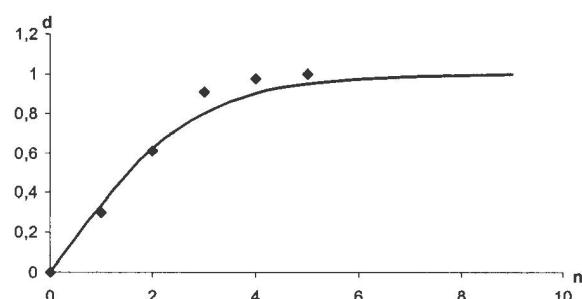
и) ПВЖ $R = 0,978692$,
 $t_R = 46,42508$



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



л) КИВЦЭТ $R = 0,982618$,
 $t_R = 57,01578$



м) Оутокумпу $R = 0,985877$,

Рис. 1. Сравнительная оценка расчетных данных по новой модели с объединенными показателями содержания и извлечения технологических переделов по производству меди

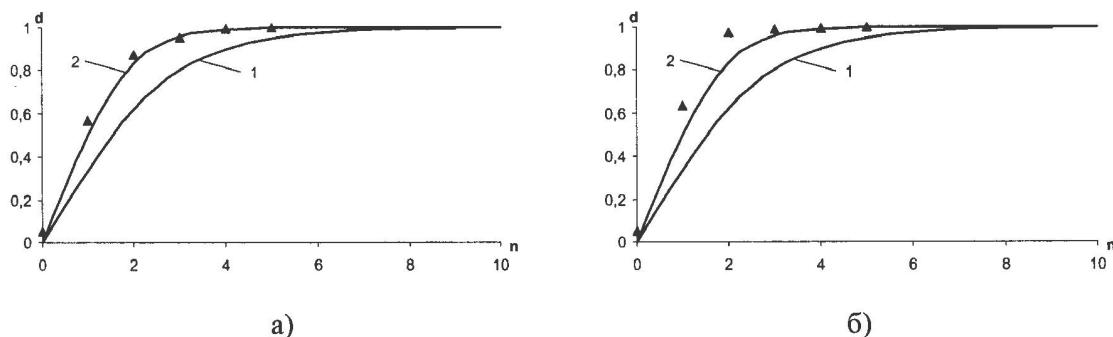
емого сырья и высокого извлечения из него всех полезных составляющих. Основным направлением развития технологии переработки сульфидного сырья является основание промышленностью новых, более технологичных и экономичных схем, построенных на базе автогенных процессов.

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 передельных продуктов. На этом основании можно

сделать заключение о возможности использования 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, основанных на использовании теплоты сгорания сульфидов для технологических нужд, в металлургию 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.

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



— н – номер уровня, d – детерминация,
1 – по интегральной модели, 2 – по дифференцированной модели,
точки – практические данные

Рисунок 2 – Сопоставление расчетных данных по предлагаемым моделям
с объединенными практическими показателями содержания и извлечения в технологиях производства стали
а) путем рафинирования чугуна, б) прямым получением железа

Результаты сравнительных расчетов по переделам и в целом по технологической схеме производства стали путем рафинирования чугуна представлены в таблице 4, прямым получением железа в таблице 5. Сопоставление расчетных данных по предлагаемой идеальной модели (таблица 1) с практическими данными (таблицы 4,5) проиллюстрируем графически в координатах n, d в соответствии с рисунком 2. В сравнении справочных данных по извлечению и содержанию целевого компонента технологической организации производства стали путем рафинирования чугуна (таблица 4) с идеальной моделью (таблица 1) выявляется адекватная корреляция ($R = 0,847942, t_R = 6,035314 > 2$) для системной детерминации, гораздо выше для уров-

невой детерминации ($R = 0,991408, t_R = 115,8812 > 2$).

В сравнении справочных данных по извлечению и содержанию целевого компонента технологической организации производства стали прямым получением железа (таблица 5) с идеальной моделью выявляется адекватная корреляция ($R = 0,733544, t_R = 3,176112 > 2$) для системной детерминации и ($R = 0,96213, t_R = 25,89641 > 2$) для уровневой детерминации.

Более тесная корреляция с дифференцированной моделью свидетельствует о более детальной разработке каждого передела в черной металлургии, в отличие от производства цветных металлов, об этом свидетельствует также и то,

Таблица 4. Информационная оценка по содержанию и извлечению железа для технологических переделов производства стали путем рафинирования чугуна

Технологические переделы	Содержания α		Извлечение 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 5. Информационная оценка по содержанию и извлечению для технологических переделов производства стали прямым получением железа

Технологические переделы	Содержания α		Извлечение 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	-	-	$3,1131 \cdot 10^{-2}$

что в большинстве случаев промежуточные продукты различных переделов реализуются как самостоятельные товарные продукты.

Предложенные нами расчеты для информационного анализа качества стали и металлургических переделов по мере переработки железа уже в первом приближении коррелируют с динамикой роста детерминированной составляющей в абстрактной иерархической системе. 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 и прямым получением железа на основании анализа энтропийно-информационных характеристик.

Сравнительная оценка на основе энтропийно-информационных характеристик двух альтернативных процессов сталеплавильного производства показывает, что сегодня еще нет сравни-

мых по мощности с традиционными доменными производствами промышленной технологии и соответствующих агрегатов для реализации такого процесса, что и подтверждается большей близостью доменного производства к идеальной иерархической системе.

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., Турдукоожаева 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 аппроксимации, рующих 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.

Карагандинский государственный университет

Поступила 25.02.2010 г.