

МЕТАЛЛУРГИЯ

МРНТИ 52.47.15

С.Ш. Кажикенова¹, Э.К. Бекмагамбетова¹

¹Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, Казахстан

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ НИКЕЛЯ

Аннотация. Впервые к анализу технологии химико-металлургических процессов и схем будут применены объективные и фундаментальные информационные критерии, выраженные в универсальных единицах информации – битах. Исследования применимы на металлургических и химических производствах, в первую очередь, на производстве цветных металлов, стали и ферросплавов, редких металлов. Разработаны информационные критерии комплексной оценки неопределенности и завершенности технологических процессов и применены для анализа существующих или усовершенствованных производств черных, цветных и редких металлов в Казахстане. Практическая значимость полученных на основе подобного подхода результатов состоит в возможности использования единых информационных критериев для экспертной оценки конкурирующих схем как на стадии выбора альтернативных проектов, так и способов усовершенствования существующих технологий, что особенно важно в условиях рыночных отношений.

Ключевые слова: энтропия, информационная емкость, алгоритм, детерминация, мониторинг качества, металлургические предприятия, производство никеля.

• • •

Түйіндеме. Жұмыста химия-металлургиялық процестер мен сұлбалар технологиясын талдауға әмбебап ақпарат бірліктері – биттермен өрнектелген, объективті және маңызды ақпараттық критерийлер алғаш рет қолданылатын болады. Кез келген металлургиялық және химиялық өндірістерге, бірінші кезекте, Қазақстандағы түсті металдар, болат пен ферроқорытпалар, сондай-ақ сирек металдар өндірістеріне таралады. Жұмыс технологиялық сұлбаларды энтропия-ақпараттық талдауға арналған, оның нәтижесінде технологиялық

процестердің белгісіздігіне және аяқталғандығына кешенді баға берудің ақпараттық критерийлері әзірленген және Қазақстандағы қара, түсті және сирек металдардың бар немесе жетілдірілетін өндірістерін талдау үшін қолданылған. Мұнымен шикізатты қайта өңдеудің технологиялық аса жетілдірілген әдістері мен сұлбаларын таңдау анықталады. Осындай ыңғай негізінде алынған нәтижелердің ғылым үшін практикалық маңыздылығы балама жобаларды таңдау сатысында бәсекелесуші сұлбаларды, сондай-ақ қолданылып жүрген технологияларды жетілдіру тәсілдерін сараптамалық бағалау үшін бірыңғай ақпараттық критерийлерді пайдалану мүмкіндігінен тұрады, бұл әсіресе нарықтық қатынастар жағдайларында маңызды болады.

Түйінді сөздер: энтропия, ақпараттық сыйымдылық, алгоритм, айқындау, сапа мониторингі, металлургиялық кәсіпорындар, никель өндіру.

• • •

Abstract. The novelty of the thesis consists in that for the first time to the analysis of the technology of chemical-and-metallurgical processes and schemes there will be applied objective and fundamental information criteria expressed in universal units, i.e. bits. The prospect of the study covers any metallurgical and chemical productions, first of all the existing in Kazakhstan production of non-ferrous metals, steel and ferrous alloys, as well as rare metals. The work is devoted to entropy-and-information analysis of technological schemes, as a result of which there are worked out information criteria of the complex estimation of technological processes uncertainty and completeness and are used for the analysis of the existing or being improved productions of ferrous, non-ferrous and rare metals in Kazakhstan. This defines the selection of technologically most perfect methods and schemes of raw material processing. The practical significance for science of the results obtained on the basis of this approach consists in the possibility to use unified information criteria for the expert assessment of the competitive schemes at the stage of selecting alternative projects, as well as methods of improving the existing technologies, which is especially important in the conditions of the market relations.

Key words: entropy, information capacity, algorithm, definition, quality monitoring, metallurgical enterprises, Nickel production.

Введение. Статья посвящена проблеме комплексного подхода к совершенствованию металлургических процессов. В качестве научной основы такого подхода рассмотрено устранение избыточной неопределенности в технологических операциях по степени их незавершенности и по недостаточному качеству получаемых продуктов. С этой целью предпринят анализ ряда процессов в металлургии цвет-

ных металлов на примере технологических операций производства никеля. При этом широко использовались различные методы исследования, в которых в равной степени учитывалась как строго детерминированная, так и случайная природа изучаемых процессов.

Алгоритмы вычисления информационной емкости системы, предложенные Шенноном, позволяют выявить соотношение количества детерминированной информации и количества стохастической информации, и тем самым дать возможность определить качественную и количественную оценку определенной технологической схемы. При общей характеристике энтропийно-информационного анализа любых объектов широко используется статистическая формула Шеннона для выражения неопределенности любой системы [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 ;

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

Мы рассмотрели применение данной формулы для количественной оценки неопределенности качества продукта или технологического передела через неопределенность главного элемента системы. 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 продуктах технологического передела. То же самое относится и к процессу извлечения элемента в тот или иной продукт. Для оценки качества продукта или технологических переделов могут быть в равной степени использованы оба этих показателя – содержание и извлечение. Таким образом, количество информации будет служить и количественной мерой определенности технологического процесса.

Если $\overline{I(d)}$, $\overline{I(h)}$ – значения информации $I(d)$, энтропии $I(h)$, отнесенные к максимальному значению энтропии по Хартли, и на основании закона сохранения суммы информации и энтропии выполнено условие [2]:

$$\overline{I(d)} + \overline{I(h)} = 1, \quad (2)$$

то относительное значение степени детерминации $\overline{I(d)}$ есть решение уравнения:

$$\overline{I(d)^n} + \overline{I(d)} - 1 = 0,$$

где $n \in Z, n \geq 0$ - номер уровня организации технологической системы.

Предложенный Шенноном метод исчисления количества информации и энтропии оказался настолько универсальным, что его применение не ограничивается теперь узкими рамками чисто технических приложений. Для конкретного численного выражения степени детерминации и стохастичности рассмотрим формулу Р.Хартли, которая применительно к уровневой имеет вид [3]:

$$H_{n(\max)} = k^n \log N_0, \quad (3)$$

где n – порядковый номер, рассматриваемого уровня, $n \in Z, n \geq 0$; k – длина кода элементов на каждом уровне иерархической системы; N_0 – число элементов уровня технологической системы, принятого за начало отсчета $n=0$.

Методы и результаты исследования. Рассмотрим технологическую схему с длиной кода $k = 2$, то есть 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, например, по никелю, а остальные принимаются в каждом переделе как единый остаток, то есть не элемент (или не никель). Тогда (3) примет вид:

$$H_{n(\max)} = 2^n \log N_0 = 2^n \log_2 2 = 2^n. \quad (4)$$

Принципиально важным преимуществом информационной оценки качества продуктов или технологических операций является то, что предлагаемый показатель H_n , как и любые энтропийно-информационные величины, можно суммировать, тем самым отображая всю систему по этому показателю. 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 технологической схемы можно выразить системным показателем неопределенности:

$$H_{\sum n(\max)} = \sum_{i=0}^n H_i = \sum_{i=0}^n 2^i \text{ бит/эл.} \quad (5)$$

Из формул для детерминированной и максимальной информации следует, что детерминированная $I_n(d)$ и системная $I_{\Sigma_n}(d)$ составляющие определяются как:

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

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

Результаты проведенных расчетов для $n=16$ представлены в таблице 1 [4].

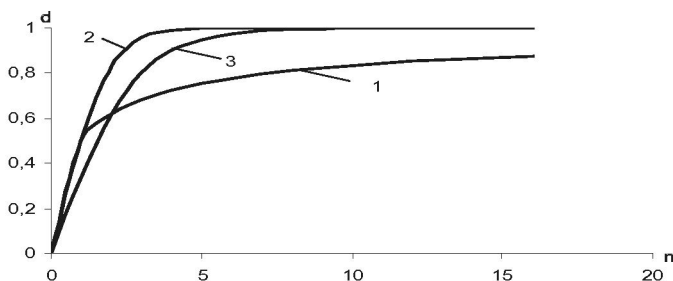
Установлено отличие системных данных от уровней, а именно интегральные величины детерминации меньше дифференцированных по уровням за счет включения в расчет информации предыдущих уровней, отличающихся большей стохастичностью. При переходе на более высокий структурный уровень вступает в действие закон или принцип прогрессивного увеличения разнообразия. Так как распределение вероятностей по этим уровням не влияет на качество продукции, то при расчетах достаточно ограничиться только междууровневыми корреляциями. Различие гармонизированной, дифференцированной и интегральной моделей проиллюстрируем графически в координатах уровень организации – степень детерминации в соответствии с рисунком 1, где n - уровень технологического передела, а d - показатель детерминации технологической системы.

Таблица 1 - Расчетные оптимальные энтропийно-информационные характеристики в иерархической системе для случая $k = 2, N_0 = 2$

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	$\left[1 - \frac{1}{(n+1)!} \right]$	$\sum_{i=0}^n 2^i \left[1 - \frac{1}{(i+1)!} \right]$	$\sum_{i=0}^n 2^i$	$\frac{\sum_{i=0}^n 2^i \left[1 - \frac{1}{(i+1)!} \right]}{\sum_{i=0}^n 2^i}$
1	2	2	4	5	6	7
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

Окончание таблицы 1

1	2	2	4	5	6	7
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



n – номер уровня, d – степень детерминации: 1 – гармонизированная, 2 – дифференцированная, 3 – интегральная

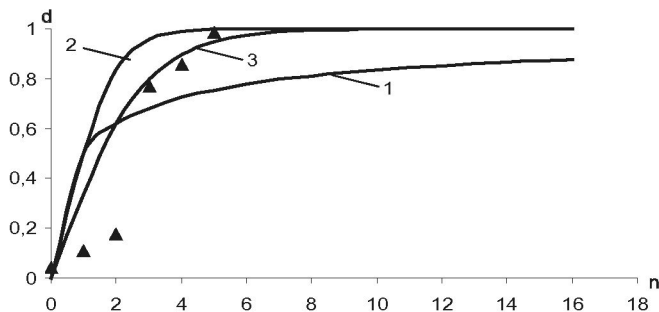
Рисунок 1 - Зависимость степени детерминации от уровня идеальной иерархической системы

Проведем энтропийно-информационный анализ качества технологических продуктов, а вместе с тем и технологических операций, приводящих к получению этих продуктов, по результатам технологических переделов производства никеля на предприятиях России (таблица 1). Содержание никеля в окисленных рудах по справочным данным [5] составляет 1,0-7,0% (в среднем 4,0%), а в концентратах 7-15% (в среднем 11%). Штейн содержит до 15-20% (в среднем 17,5%) никеля. Содержание никеля в файнштейне достигает до 76,0-78,0% (в среднем 77,0%). Закись никеля содержит 82,4-86,6% (в среднем 85,5%). В процессе восстановительной плавки показатели по содержанию никеля в продукте составляют 98,1-98,6% (в среднем 98,35%).

Данные получены в результате сопоставления расчетных данных по гармонизированной, дифференцированной и интегральной моделям с практическими данными по технологии производства никеля из окисленных руд на предприятиях России (таблица 2). Проиллюстрируем графически в координатах n, d (рисунок 2). В сравнении справочных данных по производству никеля с интегральной моделью выявляется корреляция d_{Σ} ($R=0,80604, \quad t_R=4,602016 > 2$).

Таблица 2 - Обобщенное содержание никеля в продуктах из окисленных руд на предприятиях России

Передел	Уровень организации	Наименование	Содержание, %	Среднее значение	
				%	д.е.
Добыча	0	Руда	1,0-7,0	4,0	0,0400
Обогащение	1	Концентрат	7,0-15,0	11,0	0,1100
Плавка	2	Штейн	15,0-20,0	17,5	0,1750
Конвертирование	3	Файнштейн	76,0-78,0	77,0	0,7700
Обжиг файнштейна	4	Закись никеля	82,4-86,6	85,5	0,8550
Восстановительная плавка	5	Никель	98,1-98,6	98,35	0,9835



n – номер уровня, d – детерминация: 1 – гармонизированная, 2 – уровневая, 3 – системная, точки – практические данные

Рисунок 2 - Детерминация идеальной и реальной систем по мере повышения уровня организации в никелевом производстве России (окисленные руды)

В России основу минерально-сырьевой базы никелевой промышленности образуют сульфидные медно-никелевые месторождения Норильского района: Норильск-1, Талнахское и Октябрьское. На их долю

приходится не менее 85% подтвержденных запасов никеля страны. Около 10% подтвержденных запасов никеля заключено в сульфидных месторождениях Мурманской области. Остальные 5% связаны с силикатными никелевыми рудами месторождений Южного Урала. Мировым лидером в производстве никеля и основным производителем его в России является предприятие «Норильский никель», которое добывает и выплавляет около 95% металла страны. Основным объектом разработки в последние годы являются богатые руды Норильского района, со средним содержанием никеля 3,12–3,65%. Содержание никеля в сульфидных рудах по справочным данным [5] составляет 0,3-2,5% (в среднем 1,4%), а в концентратах 4-22% (в среднем 13%). Штейн содержит до 16-26% (в среднем 21,0%) никеля. Содержание фанштейна в черновом металле достигает до 68,0-72,0% (в среднем 70,0%). Анодный никель содержит 88,4-92,0% (в среднем 90,2%). В процессе электролитического рафинирования показатели по содержанию никеля в катодах составляют 99,93-99,99% (в среднем 99,96%). Сопоставление расчетных данных по гармонизированной, дифференцированной и интегральной моделям с практическими данными по технологии производства никеля из сульфидных руд на предприятиях России (таблица 3). Проиллюстрируем графически в координатах n, d (рисунок 3.)

В результате сравнения справочных данных по производству никеля на предприятиях России с гармонизированной моделью выявляется корреляция ($R=0,6752, \quad t_R=2,482 > 2$), предпочтительной оказывается зависимость ($R=0,8339, \quad t_R=5,4743 > 2$) для $d_{\Sigma n}$.

Таблица 3 - Обобщенное содержание никеля в продуктах из сульфидных руд на предприятиях России

Передел	Уровень организации	Наименование	Содержание, %	Среднее значение	
				%	д.е.
Добыча	0	Руда	0,3-2,5	1,4	0,0140
Обогащение	1	Концентрат	4,0-22,0	13,0	0,1300
Плавка	2	Штейн	16,0-26,0	21,0	0,2100
Конвертирование	3	Фанштейн	68,0-72,0	70,0	0,7000
Огневое рафинирование	4	Анодный никель	88,4-92,0	90,2	0,9020
Электролитическое рафинирование	5	Катодный никель	99,93-99,99	99,96	0,9996

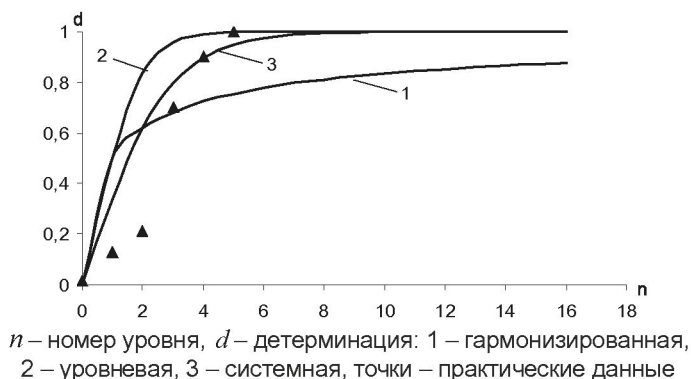


Рисунок 3 - Детерминация идеальной и реальной систем по мере повышения уровня организации в никелевом производстве России (сульфидные руды)

В Канаде все подтвержденные запасы никеля сосредоточены в сульфидных месторождениях, большая часть которых расположена в провинциях Онтарио и Манитоба [6]. Наиболее богатые по содержанию никеля руды содержат до 9% никеля, рядовые около 0,7–1,5%. Проведем энтропийно-информационный анализ качества технологических продуктов, а вместе с тем и технологических операций, приводящих к получению этих продуктов, по результатам технологических переделов производства никеля на предприятиях Канады (табл. 4,5). Содержание никеля в сульфидных рудах по справочным данным [5] составляет 0,75–1,5% (в среднем 2,25%), а в концентратах 5–24% (в среднем 14,5%). Штейн содержит до 24–30% (в среднем 27,0%) никеля. Содержание фанштейна в черновом металле достигает до 60,0–78,6% (в среднем 69,3%). Анодный никель содержит 90,4–96,0% (в среднем 93,2%). В процессе электролитического рафинирования показатели по содержанию никеля в катодах составляют 99,93–99,99% (в среднем 99,96%).

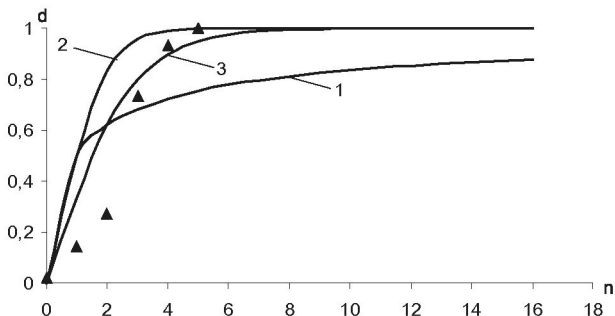
Результаты сопоставления расчетных данных по гармонизированной, дифференцированной и интегральной моделям с практическими данными по технологии производства никеля из сульфидных руд на предприятиях Канады (таблица 4) проиллюстрируем графически в координатах n, d в соответствии с рисунком 4. Таким образом, в сравнении справочных данных по производству никеля из сульфид-

ных руд на предприятиях Канады выявляется корреляция с гармонизированной моделью ($R=0,712164$, $t_R=2,890139 > 2$).

Более предпочтительной оказывается зависимость для интегральной модели α_{Σ}^d ($R=0,87667$, $t_R=7,575477 > 2$).

Таблица 4 - Обобщенное содержание никеля в продуктах из сульфидных руд на предприятиях Канады

Передел	Уровень организации	Наименование	Содержание, %	Среднее значение	
				%	д.е.
Добыча	0	Руда	0,75-1,5	2,25	0,0225
Обогащение	1	Концентрат	5,0-24,0	14,5	0,1450
Плавка	2	Штейн	24,0-30,0	27,0	0,2700
Конвертирование	3	Файнштейн	68,0-78,6	73,3	0,6930
Огневое рафинирование	4	Анодный никель	90,4-96,0	93,2	0,9320
Электролитическое рафинирование	5	Катодный никель	99,93-99,99	99,96	0,9996



n – номер уровня, d – детерминация: 1 – гармонизированная, 2 – уровневая, 3 – системная, точки – практические данные

Рисунок 4 - Детерминация идеальной и реальной систем по мере повышения уровня организации в никелевом производстве Канады (сульфидные руды)

Содержание никеля в окисленных рудах (таблица 4) по справочным данным [5] составляет 1,6-4,5% (в среднем 3,05%), а в концентратах 9-14% (в среднем 11,5%). Штейн содержит до 12-20% (в среднем 16,0%) никеля. Содержание никеля в файнштейне достигает до 78,0-79,5% (в среднем 78,75%). Закись никеля содержит 86,4-92,0% (в сред-

нем 89,2%). В процессе восстановительной плавки показатели по содержанию никеля в катодах составляют 98,1-98,6% (в среднем 98,35%).

Сопоставление расчетных данных (таблица 5) по предлагаемым гармонизированной, дифференцированной и интегральной моделям с практическими данными по технологии производства никеля из окисленных руд на предприятиях Канады проиллюстрируем графически в координатах n, d в соответствии с рисунком 5.

Таблица 5 - Обобщенное содержание никеля в продуктах из окисленных руд на предприятиях Канады

Передел	Уровень организации	Наименование	Содержание, %	Среднее значение	
				%	д.е.
Добыча	0	Руда	1,6-4,5	3,05	0,0305
Обогащение	1	Концентрат	9,0-14,0	11,5	0,1150
Плавка	2	Штейн	12,0-20,0	16,0	0,1600
Конвертирование	3	Файнштейн	78,0-79,5	78,75	0,7875
Окислительный обжиг	4	Анодный никель	86,4-92,0	89,2	0,8920
Восстановительная плавка	5	Катодный никель	98,1-98,6	98,35	0,9835

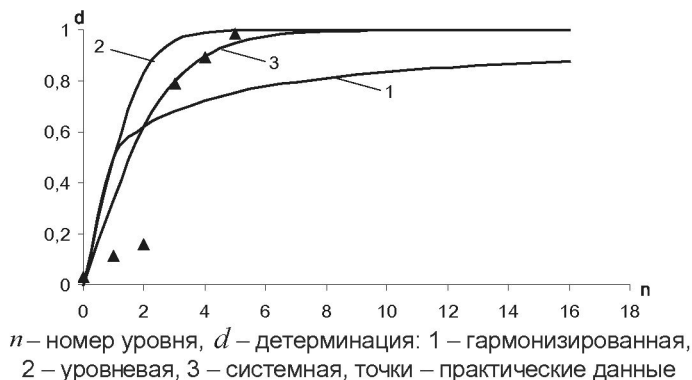


Рисунок 5 - Детерминация идеальной и реальной систем по мере повышения уровня организации в никелевом производстве Канады (окисленные руды)

По расчетам в сравнении справочных данных по производству никеля из окисленных руд на предприятиях Канады с предлагаемой моделью выявляется корреляция ($R=0,811531$, $t_n=4,753902 > 2$)

для интегральной модели $d_{\sum n}$, что также соответствует наиболее детальному учету как уровней, так и общесистемных особенностей детерминации системы, которые в первом приближении концентрированно выражаются в изменении содержания никеля в продукте по мере технологической организации его извлечения.

Выводы

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 для производства никеля;

2. Установлена корреляционная зависимость идеальной иерархической структуры сложных систем со структурой технологических схем реальных металлургических производств никеля и дана сравнительная оценка технологической завершенности и совершенства металлургических процессов на примере производства цветных металлов;

3. В качестве основных инструментов комплексного энтропийно-информационного анализа различных металлургических процессов производства цветных металлов с целью их усовершенствования использован новый метод оценки комплексной неопределенности технологической схемы, позволяющий установить ее надежность на основе фундаментальных закономерностей теории информации. Полученные информационные формулы для расчета уровневой и комплексной неопределенности и завершенности технологических переделов и схем могут быть использованы не только в металлургической, но и в любой другой технологии.

Список литературы

1. Шеннон К.Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. – М.: ИЛ, 1963. – С. 243-332.

2. S. Kazhikenova, V. P. Malyshev, A. Turdukozhaeva. A Qualitative and Quantitative Evaluation of the Technological Processes in the Metallurgy of Nonferrous Metals // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – Springer NY, 2009. - Vol. 50. -No. 4. – P. 335-337, [Electronic resource]: <http://link.springer.com/article/10.3103/S106782120904004X>

3. Хартли Р. Передача информации / Теория информации и ее приложения. – М.: ИЛ, 1959. – С. 5-35.

4. *Kazhikenova S.* Monitoring of Process Flow Diagrams in the Production of Ferrous Metals // Refractories and Industrial Ceramics. – SpringerLink, 2016. – Vol.57, № 4. – P. 360-363, [Electronic resource]: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11148-016-9984-8>

5. *Гудима Н.В., Шейн Я.П.* Краткий справочник по металлургии цветных металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 536 с.

6. *Афанасьев Л.И.* Обзор минеральных ресурсов стран капиталистического мира. Всесоюзный геологический фонд. – М.: Геолиздат, 1972. – 375с.

Кажикенова С.Ш., доктор технических наук, профессор,
e-mail: sauleshka555@mail.ru

Бекмагамбетова Э.К., магистр политических наук, преподаватель КарГТУ,
e-mail: eisma_87@mail.ru