

УДК 669 + 519.2

С.Ш. Кажикенова, В.П. Малышев, Е.А. Оспанов, А.М. Нурмагамбетова

### КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КОМПЛЕКСНОЙ ОПРЕДЕЛЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Нами предложена сокращенная информационная формула для оценки неопределенности качества продукта или технологической операции по главному элементу в продукте или операции через содержание или извлечение. На основе этой формулы возможен расчет комплексной неопределенности группы анализируемых технологических операций до и после их усовершенствования, а также технологических схем в целом в единицах информации (битах). Для информационного анализа технологических переделов мы взяли известную статистическую формулу Шеннона [1-4]

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

где  $p_i$  – вероятность обнаружения какого-либо однородного элемента системы в их множестве  $N$ . Детальное применение этой формулы для характеристики неопределенности той или иной технологической операции представляет сложность ввиду необходимости учета всех без исключения элементов системы, поэтому при анализе ключевых технологических операций обычно ограничиваются только качественной оценкой неопределенности по явному ее убыванию, но без количественного выражения. Между тем имеется возможность использования данной формулы для количественной оценки неопределенности качества продукта или технологической операции только через неопределенность главного элемента системы, что может быть принято в виде первого приближения для решения более общей задачи, требующей специального рассмотрения. В качестве характеристики вероятности обнаружения главного элемента системы можно принять его содержание, выраженное в долях единицы. Например, это содержание извлекаемого химического элемента (меди, рения, молибдена и др.) или 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 неопределенности качества продукта или технологической операции. Тогда применительно к единственному контролируруемому элементу системы обычные выкладки для выражения информационной неопределенности становятся более краткими и сводятся к следующему.

Если  $p$  – вероятность обнаружения (в продукте или при извлечении) контролируемого элемента, то неожиданность или неопределенность этого обнаружения равна обратной величине от его определенной идентификации, т.е.  $1/p$ . В нашем упрощенном варианте оценки неопределенности поведения только одного элемента системы эта неопределенность выразится как

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

Здесь, как принято в теории информации, используется двоичный логарифм для выражения альтернативного исхода любого события (обнаружить – не обнаружить), а также для получения результата, равного одному биту (от binary unit – двоичная единица) при равной вероятности  $p = 0,5$  как обнаружить, так и не обнаружить элемент. Этот результат получается как по общей формуле (1), так и по предлагаемой для частного случая (2). Для простоты расчета двоичный логарифм переводится в натуральный по тождественной процедуре. Тем самым размерность результата сохраняется в битах на элемент системы. Покажем с помощью предлагаемой формулы, как устраняется неопределенность качества технологических продуктов, а вместе с тем и технологических операций, приводящих к получению этих продуктов по главным результатам, полученным при совершенствовании некоторых переделов медеплавильного производства на Жезказганском медеплавильном

Таблица 1. Сравнение неопределенности технологических операций в результате их усовершенствования

Технологические операции	$H_p$ , бит, «до»	$H_p$ , бит, «после»	$P_{H,k}$ «до»	$P_{H,k}$ «после»
Окускование	0,622	0,368	0,650	0,775
ПЖВ	0,138	0,072	0,9089	0,9515
Анодная плавка	0,011	0,009	0,9925	0,9938
Извлечение рения	1,58	1,060	0,335	0,480
Утилизация $SO_2$	0,736	0,112	0,600	0,925
Извлечение молибдена	0,519	0,125	0,6978	0,9170
	3,606	1,746	0,082	0,298

заводе (ЖМЗ) и Балхашском медеплавильном заводе (БМЗ) [5-6]. Так, по данным промышленного освоения процесса брикетирования медной шихты, выход годного класса (+1,25 мм) после сушки брикетов в среднем 77,5%, а после сушки окатышей в среднем 65%. Для брикетной технологии  $H_1$  и для окатыwania  $H_2$  неопределенность составит

$$H_1 = -\frac{\ln 0,775}{\ln 2} = 0,368, \quad H_2 = -\frac{\ln 0,65}{\ln 2} = 0,622.$$

Значит, неопределенность при переходе от брикетирования к окатыванию уменьшилась в  $0,622 / 0,368 = 1,7$  раза.

Основной результат проведенной работы по научному, технологическому и техническому обоснованию направлений совершенствования плавки в жидкой ванне в конечном итоге сводится к возможности повышения извлечения меди в черновую медь. За период реализации различных технических и технологических мероприятий с 2000 по 2006 гг. этот показатель увеличился с 90,89 % до 95,15%, следовательно:

$$H_3 = -\frac{\ln 0,9089}{\ln 2} = 0,1378, \quad H_4 = -\frac{\ln 0,9515}{\ln 2} = 0,0717.$$

При этом неопределенность качества уменьшилась в  $0,1378 / 0,0717 = 1,92$  раза.

В результате оптимизации шихтования анодной плавки наилучшие показатели по содержанию меди в анодах (99,38%) получены при соразмерном и умеренном шихтовании собственной твердой и привозной черновой меди (13,0% и 12,6%), а наихудшие (99,25%) – при явном избытке как собственной (48,5%), так и привозной (18,8%) черновой меди. Неопределенность качества анодной меди по этому металлу составила:

$$H_5 = -\frac{\ln 0,9938}{\ln 2} = 0,0090, \quad H_6 = -\frac{\ln 0,9925}{\ln 2} = 0,0108.$$

При этом неопределенность качества уменьшилась в  $0,0108 / 0,0090 = 1,21$  раз.

В настоящее время рений из медной шихты ЖМЗ улавливается из отходящих плавильных газов через промывную серную кислоту с получением товарного перрената аммония в среднем на 33,5%. По предлагаемой нами технологии обжига содержащийся в свинцовой пыли рений переходит в эту пыль из медной шихты в среднем на 17,5%, затем на шахтной обжиговой установке в отходящие газы на 95% и после объединения с отходящими плавильными газами ЖМЗ переходит в промывную кислоту на 90%, откуда на 97% извлекается в товарный перренат. Итого по предлагаемой технологии дополнительное извлечение рения в товарную продукцию составит 14,5%, а вместе с извлекаемым напрямую из металлургических газов  $33,5\% + 14,5\% = 48\%$ . При этом неопределенность процесса извлечения рения по существующей технологии будет:

$$H_7 = -\frac{\ln 0,335}{\ln 2} = 1,58, \quad H_8 = -\frac{\ln 0,48}{\ln 2} = 1,06.$$

При этом неопределенность качества умень-

шилась в  $1,58 / 1,06 = 1,49$  раз.

Извлечение серы в газы перед электрофильтрами за счет реконструкции напыльников конвертеров увеличилось с 73,8% до 88,1%. Соответственно неопределенность:

$$H_9 = -\frac{\ln 0,738}{\ln 2} = 0,438, \quad H_{10} = -\frac{\ln 0,881}{\ln 2} = 0,183$$

уменьшилась в  $0,438 / 0,183 = 2,4$  раза.

Более радикальным представляется устранение неопределенности в утилизации сернистого ангидрида в условиях БМЗ, где этот газ в 90-е годы начал сбрасываться в трубу из-за резкого падения спроса на серную кислоту. До этого во время работы сернокислотного цеха по старой технологии уровень утилизации серы из сырья составлял, как и в настоящее время в условиях ЖМЗ, около 60%. После внедрения нового сернокислотного комплекса на БМЗ степень утилизации серы из сырья составляет в среднем 92,5%. Таким образом, неопределенность новой технологии:

$$H_{11} = -\frac{\ln 0,6}{\ln 2} = 0,736, \quad H_{12} = -\frac{\ln 0,925}{\ln 2} = 0,112$$

снизилась в 6,6 раз.

Столь же существенным оказывается снижение технологической неопределенности при извлечении молибдена из коллективного медно-молибденового концентрата в реализуемый продукт по предлагаемой схеме на 91,7% против 69,78% по существующей. При этом показатель  $H_p$ :

$$H_{13} = -\frac{\ln 0,6978}{\ln 2} = 0,519, \quad H_{14} = -\frac{\ln 0,917}{\ln 2} = 0,125$$

уменьшается в 4,15 раз.

Принципиально важным преимуществом информационной оценки качества продуктов или технологических операций является то, что предлагаемый показатель  $H_p$ , как и любые энтропийно-информационные величины, можно складывать, 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 отношении различных элементов в пределах единой технологической схемы можно выразить комплексным показателем неопределенности:

$$H_{p,k} = \sum_{i=1}^k H_{p,i}, \text{ бит.} \quad (3)$$

Этот комплексный показатель отображает именно системную технологическую неопределенность, так как предполагается равноценность всех входящих в общую схему технологий с точки зрения недостаточности их реализации. При этом извлечение какого-либо элемента в результате технологической операции отождествляется с вероятностью его перехода в целевой продукт. Содержание же элемента в этом продукте с вероятностью обнаружения данного элемента в продук-

те. Для оценки комплексной неопределенности  $H_{p,k}$  ограничимся анализом полученных результатов с чисто технологической точки зрения, т.е. по равноценности извлечения для любых элементов, в данном случае по конкретным результатам проведенных технологических разработок (табл. 1).

Из таблицы следует, что в целом комплексная неопределенность технологии переработки медного сырья по учитываемым операциям уменьшилась более чем в два раза, т.е. выразилась не только качественно, но и количественно. Получив характеристику комплексной неопределенности технологической схемы  $H_{p,k}$  можно с помощью обращенной формулы (2) найти соответствующую ей характеристику

$$P_{H,k} = \exp(-H_{p,k} \ln 2) = 2^{-H_{p,k}}, \quad (4)$$

доли единицы (д.е.).

Следует подчеркнуть, что данная величина принципиально отличается от простого усреднения по извлечению или содержанию извлекаемых компонентов, так как комплексная определенность  $P_{H,k}$ , будучи рассчитанной через информационную характеристику  $H_{p,k}$ , учитывает ценность каждого добавленного процента или его доли не аддитивно, а синергетически, т.е. с усилением. Тем самым комплексная определенность технологической схемы  $P_{H,k}$  также является информационной оценкой системы технологических операций, подобной применяемым в теории информации для различных вспомогательных относительных (безразмерных) характеристик, например, по степени детерминации, коэффициенту избыточности и др. [1-4]. Величину  $P_{H,k}$  можно рассчитывать непосредственно из исходных данных по извлечению или содержанию компонентов, т.е. по  $p_i$ , раскрыв  $H_{p,k}$  в (4) через (3) и (2):

$$P_{H,k} = \exp\left(-\ln 2 \sum_{i=1}^k H_{p,i}\right) = \exp\left(\ln 2 \sum_{i=1}^k \frac{\ln p_i}{\ln 2}\right) = \exp\left(\sum_{i=1}^k \ln p_i\right) = \prod_{i=1}^k p_i. \quad (5)$$

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. По данным табл. 1, комплексная определенность рассмотренных операций, согласно (4) и (5), до и после усовершенствования:

$$P_{H1} = 0,65 \cdot 0,9089 \cdot 0,9925 \cdot 0,335 \cdot 0,6 \cdot 0,6978 = 0,082$$

$$P_{H2} = 0,775 \cdot 0,9515 \cdot 0,9938 \cdot 0,48 \cdot 0,925 \cdot 0,917 = 0,298$$

с улучшением в 3,64 раза.

Как можно заметить, кратности уменьшения комплексной неопределенности (в 2,06 раза) и увеличения комплексной определенности (в 3,64 раза) в общем случае не совпадают, что характерно при сопоставлении чисто вероятностных и информационных величин. Эти показатели по кратности могут изменяться на противоположные или становиться равными в зависимости от близости исходных данных к нулю, к единице или к центру интервала своего изменения. В любом случае повышение одного из них всегда будет сопровождаться снижением другого, что прямо следует из их взаимной зависимости (4). Как принято в теории информации, подобные показатели являются взаимно дополнительными и с разных сторон характеризуют информационное состояние объекта по его предсказуемости и надежности (в данном случае, по  $P_{H,k}$ ) или по непредсказуемости и несовершенству (в данном случае, по  $H_{p,k}$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов Е.А. Эволюция и информация. – М.: Наука, 1976. – 232 с.
2. Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное отображение. – Алматы-Караганда: Гылым, 1994. – 376 с.
3. Хартли Р. Передача информации /Теория информации и ее приложения. – М.: ИЛ, 1959. – С. 5-35.
4. Шеннон К.Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. – М.: ИЛ, 1963. – С. 243-332.
5. Оспанов Е.А. Методологические проблемы обеспечения качества в технологии производства меди // Матер. III межд. конф. «Стратегия качества в промышленности и образовании». – Варна, 2007. – Т. 1. – С. 420-422.
6. Оспанов Е.А., Малышев В.П., Нурмагамбетова А.М. Проблемы устранения избыточной неопределенности в технологии медного производства // Химическая технология: Сб. тез. докладов Межд. конф. по химической технологии ХТ'07. – Т. 4. – Москва: ЛЕНАНД, 2007. – С. 272-274.

□ Авторы статьи

Кажикенова  
Сауле Шарапатовна  
- канд. техн. наук, доц.  
каф. высшей математики  
(Карагандинский гос. техн.  
университет )  
[sauleshka555@mail.ru](mailto:sauleshka555@mail.ru)

Малышев  
Виталий Павлович  
- докт. техн. наук, проф. ,  
зав. лаб. энтропийно-  
информационного анализа  
Карагандинского Химико-  
металлургич. института

Оспанов  
Еркен Абдрахманович  
- канд. техн. наук, доц.  
каф. высшей математики  
(Карагандинский гос. техн.  
университет ) тел  
8(7212)567592

Нурмагамбетова  
Астра Мундуковна  
- канд. техн. наук доц. каф.  
высшей математики  
(Карагандинский гос. техн.  
университет ) тел  
8(7212)567592