

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Ариненков Ю.Д., канд. тех. наук, доцент
Донецкий государственный технический университет

Поставлена задача обосновать критерий методов оценки и прогноза параметров оптимальных режимов обогатительных процессов для целей исследования технологии в промышленных условиях и расчёта технологических схем при разработке новых технологий, при оперативном контроле работы фабрики, и дано её решение.

Put problem to motivate a standard of methods of judgement and forecast of parameters of optimum modes of coal preparation processes for the whole technology study in industrial conditions and calculation of technological schemes at the new technology development, under operative checking a work of factory, and is given its decision.

Разработка обобщённого критерия эффективности - это уже традиционная задача в математическом описании любого сколько-нибудь сложного процесса и важная составляющая общей теории эффективности, разработанной школами МГУ, Н.Н. Моисеева и Ю.Б. Гермейера, В.М. Глушкова и Н.П.Бусленко [1, 2].

Основы теории эффективности построены на методологии исследования операций и включают методы теории информации, игр, массового обслуживания, расписаний, а также на системе элементарных действий над частными критериями (свёртывания) для получения общего критерия оценки конкретного объекта или процесса.

В области обогащения полезных ископаемых эта проблема существенно упрощается, благодаря структурной однородности всего множества технологических процессов сводимая к управлению через параметр зольности разделения λ_p или плотности разделения D_p . На эту возможность ещё в 30-е годы указывали немецкие исследователи Хаарманн и Шафер, но фундаментальное значение параметра λ_p для развития теории оценки обогатимости и моделирования обогатительных систем стало понятно после работы [3], в которой впервые системно рассмотрены методы анализа и синтеза показателей обогатимости, не противоречащие основам теории эффективности. Теперь накоплен опыт (сопоставлением работы двух групп исследователей над одинаковыми объектами), свидетельствующий о принципиаль-

ном (в 1000 раз и более) ускорении исследований с применением показателя обогатимости. Тем не менее, даже столь явное различие результатов оказывается неубедительным аргументом для привлечения внимания к целеориентированному моделированию. Поэтому необходимо разработать критерий обоснованности методов оценки эффективности и прогноза результатов обогащения в форме, доступной к непосредственному применению для экспертов-обогащителей.

В математике совокупность *прямой теоремы* вида $P \Rightarrow Q$ и *обратной теоремы* вида $Q \Rightarrow P$ называют взаимно обратными теоремами. Если справедливо $P \Leftrightarrow Q$, то они вместе называются *критерием* или *необходимым и достаточным условием*. Пусть *прямая теорема* вида $P_\phi \Rightarrow Q$ устанавливает соответствие критерия эффективности Q , $Q = Q(\mathcal{S}, I_{\text{изб}}, \lambda_p)$, где \mathcal{S} - показатель селективности разделения; $I_{\text{изб}}$ - коэффициент избирательности; λ_p - заданная зольность разделения, параметрам процесса P_ϕ , $P_\phi = P(D_i, \gamma_{и,i}, A_{и,i}^d, \lambda_p, \gamma_{кф,i})$, где D_i - плотность i -ой фракции; $\gamma_{и,i}$ - выход фракций исходного продукта; $A_{и,i}^d$ - зольность фракций; λ_p - зольность разделения; $\gamma_{кф,i}$ - выход фракций концентрата, а *обратная теорема* вида $Q \Rightarrow P_\pi$ устанавливает соответствие прогнозируемых параметров процесса P_π , $P_\pi = P(D_i, \gamma_{и,i}, A_{и,i}^d, \lambda_p, \gamma_{кп,i})$, где $\gamma_{кп,i}$ - выход фракций прогнозируемого концентрата, заранее известным (прогнозирующим) критериям процесса Q . Если средний модуль ошибок прогноза фракций концентрата

$$C_{\text{мо}} = n^{-1} (D_n - D_0)^{-1} \sum_{i=1}^n |\gamma_{кп,i} - \gamma_{кф,i}| \cdot (D_i - D_{i-1})$$

-малая величина, тогда справедливо $P_\pi \approx P_\phi \approx P$ и $P \Leftrightarrow Q$, являющееся *необходимым и достаточным условием* правильности теорем $P_\phi \Rightarrow Q$ и $Q \Rightarrow P_\pi$.

В работе автора [4] предложена и доказана теорема, основанная на том, что в области параметров обогащительного процесса выделяется криволинейный треугольник максимально возможных ошибок по зависимости

$$H(\lambda) = \gamma_{кт}(\lambda) - \gamma_{и}(\lambda) \cdot \gamma_{и}(\lambda_0) \cdot \gamma_{и}^{-1}(\lambda_{\text{max}}), \quad (1)$$

где $H(\lambda)$ - функция наибольших возможных ошибок извлечения λ -ной фракции; $\gamma_{и}(\lambda)$ - функция фракционной характеристики исходного материала; $\gamma_{и}(\lambda_{\text{max}})$ - выход всего исходного материала; $\gamma_{и}(\lambda_0)$ - выход

лабораторного концентрата для заданной величины параметра разделения $\lambda_p = \lambda_0$; $\gamma_{кт}(\lambda)$ – фракционная характеристика теоретического (лабораторного) концентрата, в свою очередь вычисляется по зависимости

$$\gamma_{кт}(\lambda) = 0,5 \cdot \{ \gamma_{и}(\lambda_0) + \gamma_{и}(\lambda) - | \gamma_{и}(\lambda_0) - \gamma_{и}(\lambda) | \}. \quad (2)$$

Указанная теорема утверждает, что при заданной зольности разделения функция наибольших ошибок является своим максимумом

$$H(\lambda_p) = \gamma_{и}(\lambda) - \gamma_{и}^2(\lambda_p) \cdot \gamma_{и}^{-1}(\lambda_{\max}), \quad (3)$$

т.е. это функция с плавающим экстремумом, величина которого зависит и от заданной зольности разделения λ_p , и от фракционной характеристики обогащаемого материала $\gamma_{и}(\lambda)$. Теперь знание функции (3) позволяет нормировать ошибки, исключив или хотя бы ослабив этим влияние на их оценку и зольности разделения λ_p , и самой фракционной характеристики исходного материала $\gamma_{и}(\lambda)$.

Тем не менее, положение экстремума функции наибольших ошибок останется плавающим, наиболее стабильной оценкой ошибок разделения окажется только площадь криволинейного треугольника ошибки, вычислить которую можно интегрированием или, что в неявном виде то же самое, по конечным результатам обогащения. Оценить процесс в этом случае следует показателем селективности по нижеследующей зависимости [3]:

$$E_{\text{сел}} = \frac{(\lambda_p - \beta_k) \cdot \gamma_k - (\lambda_p - \beta_{и}) \cdot \gamma_{кт}}{(\beta_{и} - \beta_{кт}) \cdot \gamma_{кт}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{сел}}$ – показатель селективности; λ_p – заданная зольность разделения; γ_k – выход фактического концентрата с зольностью β_k ; $\gamma_{кт}$ – выход теоретического (лабораторного) концентрата с зольностью $\beta_{кт}$; $\beta_{и}$ – зольность исходного угля.

Показатель селективности (4) является ядром теоремы $P_{\phi} \Rightarrow Q$: возмущающие параметры в технологическом процессе создают треугольник ошибок извлечения фракций, форма и величина которого определяет параметры получаемых продуктов и селективность обогащения Q . Первая часть этого определения содержит неопределённость о способе образования треугольника ошибок (скрыты λ_p и $I_{\text{изб}}$), но это как раз те свойства технологического процесса, которые необ-

ходимо распознать и корректно описать. Для этой цели полезна обратная теорема вида $Q \Rightarrow P_n$: по известному λ_p результаты обогащения могут быть спрогнозированы через оценку селективности S и коэффициент избирательности $I_{изб}$ некоторым треугольником ошибок.

С целью корректного исключения неопределённостей из прямой теоремы $P_\phi \Rightarrow Q$ обратной ей $Q \Rightarrow P_n$ предлагается их объединение типа $P \Leftrightarrow Q$: если неизмеренные параметры в технологическом процессе создают треугольник ошибок извлечения фракций, форма и величина которого определяет фракционный состав и суммарные параметры получаемых продуктов и селективность обогащения, и поиск расчётного треугольника ошибок позволяет получить массив фракционного состава продуктов с допустимым минимальным средним модулем отклонений от опытного массива фракций с учётом их веса через диапазон плотности, то данная теорема является критерием.

Для имитационной проверки этой теоремы разработаны алгоритм и программа EXPERT07, результат применения которой к данным исследования сепаратора с шнеком СШ-15 [5] показан на рис. 1.

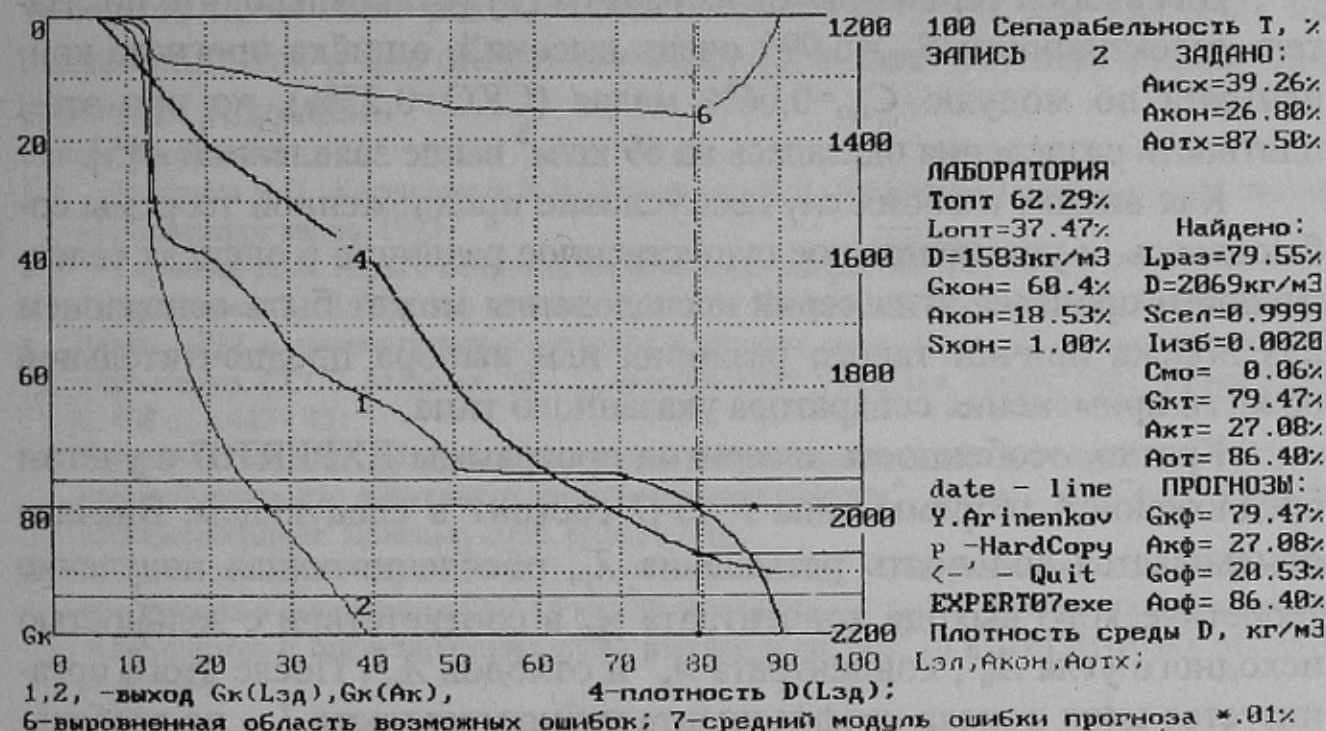
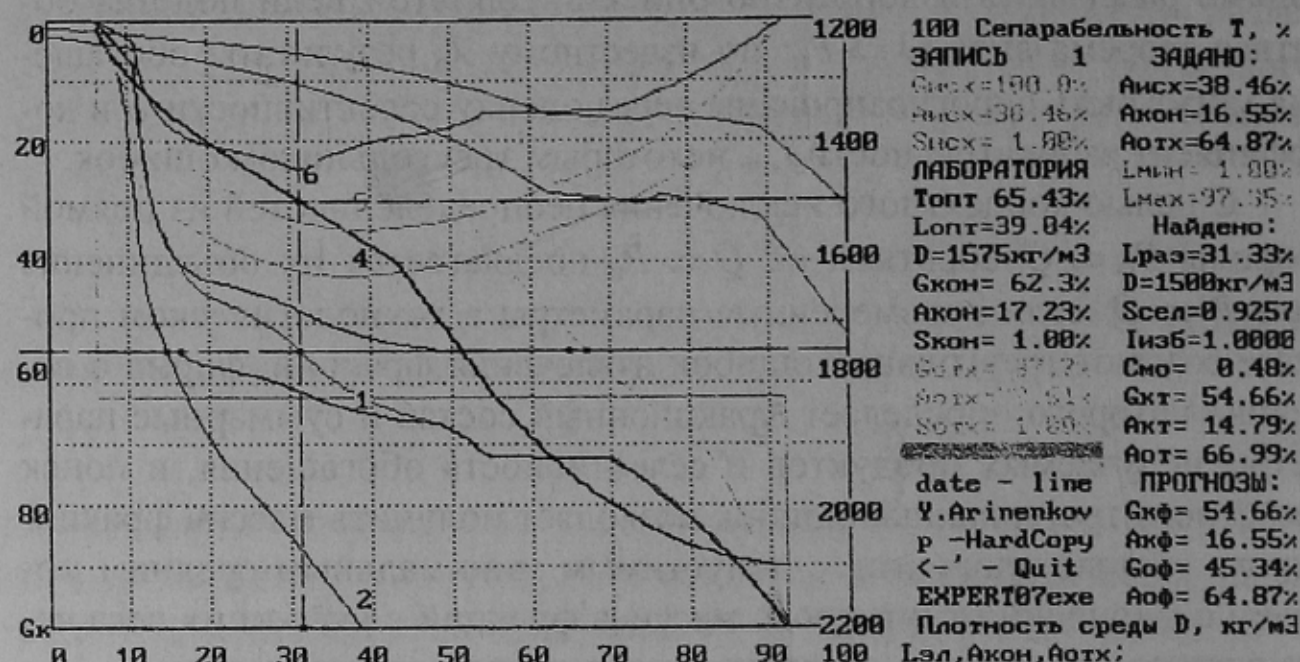


Рисунок 1 - Опыты на сепараторе при плотности 1510 кг/м³ по [5]

Данным исследованием установлено, что показатель селективности $S_{сел}=0,926$ низкий, ошибка прогноза концентрата по модулю $S_{мо}=0,48\%$ ещё приемлемая (по графику ошибки видно, что поиск её глобального минимума более обоснован, чем по СКО, см. светлую кривую), остальные результаты не отличаются от заявленных. Результаты обогащения на плотности 2000 кг/м³ показаны на рис.2.



100 Сепарабельность T, %
 ЗАПИСЬ 1 ЗАДАНО:
 Gвсх=100.0% Аисх=38.46%
 Авсх=36.46% Акон=16.55%
 Sисх= 1.00% Аотх=64.87%
 ЛАБОРАТОРИЯ Lмин= 1.00%
 Топт 65.43% Lмак=97.35%
 Лопт=39.84% Найдено:
 D=1575кг/м3 Lраз=31.33%
 Gкон= 62.3% D=1500кг/м3
 Акон=17.23% Sсел=0.9257
 Sкон= 1.00% Изб=1.0000
 Gвсх= 37.2% Смо= 0.48%
 Авсх= 36.46% Gкт= 54.66%
 Sвсх= 1.00% Акт= 14.79%
 Аот= 66.99%
 date - line ПРОГНОЗЫ:
 Y.Arinenkov Gкф= 54.66%
 p -HardCopy Акф= 16.55%
 <- - Quit Gоф= 45.34%
 EXPERT07.exe Аоф= 64.87%
 Плотность среды D, кг/м3
 Lэл, Акон, Аотх;

1,2, 3-выход Gк(Лзд), Gк(Ак), Gо(Ао); 4-плотность D(Лзд); 5-сепарабельность T(Лзд); 6-выровненная область возможных ошибок; 7-средний модуль ошибки прогноза *0.01%

Рисунок 2 - Опыты на сепараторе при плотности 2000 кг/м³ по [5]

Для второй серии опытов из работы [5] установлено, что показатель селективности $S_{сел}=0,999$ очень высокий, ошибка прогноза концентрата по модулю $C_{мо}=0,06\%$ малая (СКО=0,25%), но при этом плотность разделения оказалась на 69 кг/м³ выше заявленной в [5].

Как видим, в обоих случаях условие предложенной теоремы соблюдалось, и установленное существенное различие в оценках селективности процесса этих серий исследования может быть основанием для поиска причин такого различия или выбора предпочтительной области применения сепаратора указанного типа.

Кратко, особенность алгоритма программы EXPERT07 с учётом предложенной теоремы типа $P \Leftrightarrow Q$ состоит в следующем. Вначале отыскивается зольность разделения λ_p , обеспечивающая получение теоретического выхода концентрата $\gamma_{кт}$ в соответствии с зольностью исходного угля A_n^d , концентрата A_k^d и отходов A_o^d . После этого организуется цикл поиска коэффициента избирательности $I_{изб}$ по глобальному минимуму среднего модуля ошибок прогноза фракционного состава концентрата $C_{мо}$, а внутри этого цикла организуется вложенный цикл поиска треугольника ошибок, обеспечивающего получение заданной зольности концентрата A_k^d и отходов A_o^d с оценкой селективности $E_{сел}$. Завершается работа программы сообщением о 7 найденных оценках процесса ($\lambda_p, D_p, S_{сел}, I_{изб}, C_{мо}, A_{кт}^d, A_{от}^d$) с построением кривых и соответствующих таблиц прогнозируемого фракционного

состава продуктов обогащения. Такой же алгоритм прогноза параметров применен в макромодели схем обогащения [4].

Таким образом, предложенная теорема-критерий правильности методов оценки эффективности и прогнозирования оптимальных параметров обогатительных процессов сложную задачу корректно сводит к определению минимума среднего модуля ошибок прогноза фракционного состава концентрата. Эта теорема положена в основу программы EXPERT07. Установлено, что разработанные методы оценки параметров обогащения и прогноза результатов обогащения оба являются правильными и могут применяться без ограничений как самостоятельно, так и в сочетании друг с другом. Программное обеспечение этих методов упрощает сложную задачу до визуального анализа получаемых кривых и таблиц результатов прогноза фракционного состава продуктов обогащения. Удобный интерфейс ввода данных (данные сохраняются в специальном файле и при необходимости корректируются методом линейного преобразования), полная автоматизация исследования, ясность и содержательность получаемых результатов позволяют рекомендовать программу как для научных исследований, так и для оперативного контроля технологии в производственных условиях.

Список источников.

1. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. М., Советское радио, 1973.
2. Гермейер Ю.Б. Игры с противоположными интересами. М., Наука, 1976.
3. Ариненков Ю.Д. Методы анализа и синтеза показателей обогатимости. /В кн.: Применение ЭВМ и математических методов в горном деле. Труды 17-го международного симпозиума. СССР. Москва, 20 - 25 октября 1980 г. Москва, Недра, 1982. Томов 3, том 2, 468 с., с.447 - 451.
4. Ариненков Ю.Д. Макромодель схемы обогатительной технологии. /В кн. "Наукові праці Донецького державного технічного університету". Випуск 27. Серія: Гірничо-електромеханічна. Донецьк, 2001. 462с., с.7-16.
5. Ломанова И.А., Королёва В.И., Ахметжанова Д.С. Совершенствование технологии обогащения в сепараторах СШ-15 на ОФ шахты им. 50-летия Октябрьской революции. - «Обогащение и брикетирование угля». Научно-техн. реф. сб. (ЦНИЭИуголь), М., 1978, № 8, с.8-9.