

Б.Б. ЗОБНИН, А.А. МАКОВ,
М.Г. БА

**Виды неопределённостей,
возникающих при оценке
инвестиционных проектов
переработки шахтных вод**

УДК 004.421.2:622.5

ФГБОУ ВО
«Уральский
Государственный Горный
Университет»,
г. Екатеринбург

Рассмотрены виды неопределённостей, возникающих при оценке инвестиционных проектов переработки шахтных вод. Для уменьшения влияния неопределённостей предложено использовать модель в классе линейных разностных уравнений, прогнозирующую значения выходных переменных процесса переработки кислых рудничных вод с учётом состояния технологического оборудования и квазистационарности технологического режима. Предложен алгоритм параметрической идентификации прогнозирующей модели по ограниченной выборке.

Ключевые слова: неопределённость оценок, инвестиционные проекты, переработка шахтных вод, идентификация прогнозирующей модели.

Вода современных водоёмов в результате производственной деятельности человека часто содержит загрязнения, которые невозможно удалить на повсеместно применяющихся сооружениях для очистки воды от взвешенных и коллоидных веществ — фильтрах, осветлителях, отстойниках. К такого рода загрязнениям относится железо, значительные концентрации которого все чаще обнаруживаются в воде поверхностных водоёмов. Особенно большое количество железа (сернокислого) наблюдается в реках, принимающих кислые шахтные воды.

Кислые рудничные воды (КРВ), изливающиеся из шахт, находящихся на «мокрой» консервации, относятся к месторождениям гидроминерального сырья. Существует большое число инвестиционных проектов переработки этих вод с извлечением из них тяжёлых металлов. Проект представляет собой систему уникальных в своём роде чётко определённых действий, направленных на получение конкретных результатов в многофункциональном окружении в течение установленного срока и в рамках выделенных ресурсов с привлечением группы людей, обладающих разносторонними навыками и знаниями, работающих под специальным руководством. Жизненный цикл проекта-промежуток времени между моментом появления, зарождения проекта и моментом его ликвидации, завершения - является исходным понятием для исследования проблем финансирования работ по проекту и принятия соответствующих решений. Основой расчёта жизненного цикла проекта являются результаты мониторинга расходов КРВ и содержаний металлов в этих водах. Результаты измерений искажены погрешностями. Согласно последним международным требованиям в области метрологии и стандартизации основной оценкой качества результата измерений рекомендуется считать его неопределённость [1].

На этапе выбора инвестиционных проектов переработки шахтных вод возникают следующие виды неопределённостей, определяющие значения технико-экономических показателей конкретных проектов:

- тренды во времени содержаний цветных металлов и редкоземельных элементов (РЗЭ) в КРВ;
- вариации динамики накопления шламов после нейтрализации и осветления вод в прудках-отстойниках;
- вариации доли рынка сбыта продукции, получаемой из металлов, содержащихся в КРВ;
- изменение платежей за загрязнение окружающей среды (ОС);
- изменения выплат компенсационного характера за нанесённый здоровью населения ущерб, обусловленный воздействием загрязняющих веществ (потеря трудоспособности, снижение дохода в результате болезни).

Наличие всех этих видов неопределённостей требует прогнозирования доли извлекаемых ценностей из КРВ, а также других выше перечисленных показателей.

В качестве примера приведём оценки извлекаемой ценности цветных металлов и РЗЭ из шахтных вод Левихинского рудника.

Таблица 1

Ранжированный ряд по извлекаемой ценности цветных металлов и РЗЭ из шахтных вод Левихинского рудника (тыс. \$ США/год) [2]

Элемент	Извлекаемая ценность, 2008	Извлекаемая ценность, 2013	Элемент	Извлекаемая ценность, 2008	Извлекаемая ценность, 2013
Zn	3212	891	Ce	220	84
Al	2016	1111	Pr	144	70
Mn	988	175	Sm	124	61
Co	183	45	Er	82	39
	РЗЭ				
Dy	2015	876	Lu	66	31
Eu	1511	636	Yb	64	30
Y	557	320	Gd	230	95
Tb	625	283	La	55	18
Nd	605	282			

Итого: 13 172 (2008) 5 152(2013)

В том числе РЗЭ 6 352 (2008) 2 850 (2013) в том числе цветных металлов 6 820 (2008) 2 302 (2013)

Для расчёта использованы: по цветным металлам – данные Лондонской биржи, среднее – сентябрь 2012-август 2014 г., по РЗЭ – анализ динамики цен на РЗМ, в период отработки потенциальная извлекаемая ценность в среднем в год составляла 3,9 млн \$ США, в том числе 2,4 млн \$ США цветных металлов и 1,5 млн \$ США РЗЭ (в современных ценах)

Извлечение металлов осуществляется переводом растворенных солей в твёрдую фазу и разделением жидкой и твёрдой фаз с последующим обезвоживанием и утилизацией осадка.

Химический состав шахтных вод (табл.1) позволяет получить при их переработке набор товарных продуктов, например, цинковый порошок 40/100 ПР-ЦнЮ16, стоимость которого составляет 2000 р/кг. Объем продаж определяем, исходя из среднего содержания цинка в шахтной воде за 2013г: 500мг/л = 0,5 г/л. В кубометре воды содержится 500 г/м³ Предполагаемое извлечение цинка в твёрдый осадок составляет 0.8. При среднем суточном расходе воды 3969 м³

масса цинка составляет: $3969 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 1587,600$ кг. При цене цинкового порошка 2000 р/кг суточный объем продаж составляет 1388,284 тыс.р. Годовой объем продаж 506723 тыс.р.

Технология повышения достоверности контроля состояния процесса включает в себя:

- Обнаружение аномальных результатов контроля технологических параметров в условиях, когда невозможна взаимная проверка показаний различных датчиков;

- Коррекция замеренных значений по отдельному потоку с учётом того, чтобы отклонения расчётных значений от истинных были бы минимальными с учётом точности контроля расходов по каждому потоку;

- Определение и устранение аномальных значений результатов дискретного контроля (алгоритм предназначен для обработки ограниченного числа наблюдений, для которых статистические методы обработки не могут быть использованы из-за недостаточной представительности числа наблюдений и отсутствия сведений о вероятностных характеристиках погрешностей наблюдения).

- Квазистационарность проектируемого мобильного технологического комплекса переработки КРВ заставляет решать задачу параметрической идентификации прогнозирующей модели по ограниченной выборке. Объем выборки определяем из условий компромисса между необходимостью иметь численно устойчивые оценки коэффициентов модели и стремлением минимизировать усреднение изменяющегося во времени сигнала.

- Выходные переменные проектируемого мобильного технологического комплекса переработки КРВ, характеризующие качество очистки воды и характеристики извлекаемых из неё металлов, изменяются в узких диапазонах и контролируются дискретно, поэтому модель, прогнозирующая качество выходных переменных с учётом состояния технологического оборудования и квазистационарности режима, построена в классе линейных разностных уравнений вида [3]:

$$- Y_j(n) = \sum_{i=1}^K a_i * Y_j(n-i) + \sum_{r=1}^l \sum_{i=0}^m b_{ri}(\mu) * u_r(n-i) + \varphi(n) + \xi(n), \quad (1)$$

где n - момент дискретного времени;

- Y_j - j -я качественная характеристика очищенной воды;

- U_r - r -я входная переменная, $r = 1, \dots, l$;
- ξ - случайная помеха, имеющая статистические характеристики $M\{\xi(n)\} = 0$, $M\{\xi^2(n)\} = \sigma_\xi^2$;
- m, K - глубина памяти объекта по управлениям и по возмущению;
- $\varphi(n)$ - возмущение, обусловленное состоянием оборудования;
- μ - параметрическое возмущение, изменяющее коэффициенты передачи по управляющим воздействиям.

Первое слагаемое в уравнении (1) является авторегрессионной (АР) составляющей. Коэффициенты АР-составляющей найдены методом наименьших квадратов (МНК) из уравнения Юла-Уокера при известных значениях автокорреляционных функций качественных характеристик очищенной воды.

Идентификация параметров, прогнозирующих модели включает в себя следующие комплексы процедур:

- расчёт по детерминированным моделям с использованием характеристик шихты значений коэффициентов передачи по управляющим воздействиям;
- расчёт МНК коэффициентов АР-составляющей;
- расчёт по детерминированной модели возмущения, обусловленного изменением во времени состояния оборудования;
- подстройка коэффициентов модели по отклонению фактических значений характеристик качества агломерата от прогнозируемых значений.

Квазистационарность ТКПА заставляет решать задачу параметрической идентификации прогнозирующей модели по ограниченной выборке. Объем выборки определяем из условий компромисса между необходимостью иметь численно устойчивые оценки коэффициентов модели и стремлением минимизировать усреднение изменяющегося во времени сигнала. Ограничившись для простоты записи случаем скалярной выходной переменной, представим уравнение (1) для моментов времени $n = k + 1, \dots, k + m$ в виде:

$$\begin{aligned}
- Y(k+1) &= \sum_{i=1}^k a_i * Y(k+1-i) + \sum_{i=1}^r b_i * U(k+1-i) + \xi(k+1), \\
- Y(k+1) &= \sum_{i=1}^k a_i * Y(k+1-i) + \sum_{i=1}^r b_i * U(k+1-i) + \xi(k+1), \\
- Y(k+2) &= \sum_{i=1}^k a_i * Y(k+2-i) + \sum_{i=1}^r b_i * U(k+2-i) + \xi(k+2), \\
&\dots\dots\dots \\
- Y(k+m) &= \sum_{i=1}^k a_i * Y(k+m-i) + \sum_{i=1}^r b_i * U(k+m-i) + \xi(k+m)
\end{aligned} \tag{2}$$

или в векторной форме

$$- \bar{Y}_{k+1}^{k+m} = \bar{Y} * a + \bar{U} * b + \xi_{k+1}^{k+m} \tag{3}$$

где: $a = (a_1, \dots, a_k)^T$, $b = (b_1, \dots, b_r)^T$

$- y_i^{i+j} = (y(i), y(i+1), \dots, y(i+j))^T$

$- Y = [y_k^{k+m-1}, y_{k-1}^{k+m-2}, \dots, y_1^m] - m \times k$ матрица;

$- U = [U_k^{k+m-1}, U_{k-1}^{k+m-2}, \dots, U_{k-r}^m] - m \times r$ матрица.

Задача идентификации коэффициентов a , b сводится к решению линейной системы:

$$- Y = A * X + \xi, \tag{4}$$

в которой $y = y_k^{k+m}$, $A = [Y : U]$, $X = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$, $\xi = \xi_k^{k+m}$

Классический способ решения системы (4) даёт метод наименьших квадратов:

$$- \hat{X} = [A^T A]^{-1} A^T * y \tag{5}$$

Обоснованием эффективности этого метода является теорема Гаусса-Маркова, согласно которой \hat{X} , найденный из уравнения (5), является наилучшей линейной несмещённой оценкой. Её погрешность задаётся соотношением:

$$- M \{ (X - \hat{X})(X - \hat{X})^T \} = \sigma^2 [A^T A]^{-1} \tag{6}$$

Применить такую оценку можно лишь в случае, когда матрица $A^T A$ является невырожденной. В случае, когда матрица $A^T A$ близка к вырожденной (мультиколлинеарность A), задача

определения параметров X становится некорректной. Экстремальная задача называется корректной по Адамару, если её решение X^* существует единственно и непрерывно зависит от исходных данных и погрешности вычислительного процесса.

Заключение

Для уменьшения влияния неопределённостей, возникающих при оценке инвестиционных проектов переработки шахтных вод предложено использовать модель в классе линейных разностных уравнений, прогнозирующую значения выходных переменных процесса переработки кислых рудничных вод с учётом состояния технологического оборудования и квазистационарности технологического режима.

Литература

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition. – ISO, Switzerland, 1993 – 101 с
2. Рыбникова Л.С. Процессы формирования подземных вод в горнодобывающих районах Среднего Урала на постэксплуатационном этапе//Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук, М.,2019
3. Б.Б. Зобнин, О.А. Горбенко, И.А. Ажипа, Р.А. Яковлев. Имитационная модель технологического комплекса подготовки шихты для производства агломерата//Восточно - Европейский журнал передовых технологий, N1/9(73) 2015

ЗОБНИН БОРИС БОРИСОВИЧ- ПРОФЕССОР
КАФЕДРЫ ИНФОРМАТИКИ УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИ-
ТЕТА (УГГУ), Д.Т.Н., ZOBNINBV@MAIL.RU

МАКОВ АНТОН АНДРЕЕВИЧ - МАГИСТРАНТ
КАФЕДРЫ ИНФОРМАТИКИ УГГУ

БА МАМАДУ ГАНДО - МАГИСТРАНТ КАФЕДРЫ
ИНФОРМАТИКИ УГГУ

Рецензент: Тяботов Иван Андреевич, к.т.н., доцент кафедры природообустройства УГГУ