

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТИКИ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ

В. И. Салыга

Харьков

Автоматизация процесса флотации должна идти по пути разработки единого алгоритма, аналитически полностью описывающего технологический процесс. Однако из-за сложности физико-химических процессов, характеризующих флотацию, и их недостаточной изученности этот путь является чрезвычайно сложным и наиболее трудоемким. Потребуется достаточно длительное время для теоретических и экспериментальных исследований. Кроме того, нет гарантии, что полученные решения дадут достаточно точное совпадение расчетных и фактических величин основных параметров.

В этой связи основным источником информации при отыскании детального количественного описания следует считать данные, полученные экспериментальным путем. Уместно отметить следующий факт. Если некоторый объект в принципе может быть описан детерминированной характеристикой, то для практических целей удобнее пользоваться приближенным статистическим описанием. В реальных условиях происходит непрерывное «обучение» модели, и полученное статистическое описание упрощает ее экстраполяцию.

С целью накопления статистических данных на Суходольской ЦОФ (г. Краснодон) на флотомашине «Гипрокс-57» были проведены специальные исследования. Ввиду нецелесообразности составления гипотетического уравнения процесса флотации, было составлено описание по нескольким наиболее существенным параметрам.

В качестве таких параметров были приняты плотность δ и расход шуглы Q_n , расход реагентов Q_p [1,2], зольности концентрата и хвостов A_k^c , $A_{хв}^c$ были приняты в качестве выходной координаты. Существуют различные способы нахождения уравнений связи между наблюдаемыми данными. Основные параметры флотопроцесса являются случайными величинами, поэтому связи между ними наиболее просто можно найти при помощи корреляционных уравнений [5, 6].

При нахождении уравнений связи для флотации угля применение обычных методов математической статистики вызывает осложнение, а зачастую приводит к ошибочным выводам из-за недостаточного числа испытаний. Поэтому предлагается методика, основанная на правилах корреляционного анализа при малом числе испытаний. В этом случае нахождение корреляционного уравнения по методу Чебышева можно представить в следующем виде:

$$r_{j_0}^{(h)} = r_{j_0}^2(j_1) + \frac{b_1}{a} (r_{1(j_1)}^2 - r_{j_0} r_{1(j_1)} - 1) +$$

$$+ \frac{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{vmatrix}} \{ \xi_{1(j_1)}^3 - r_{j_1} \xi_{1(j_1)} - r_{j_1} - \frac{a_2}{a_1} (\xi_{1(j_1)} - 1) \} + \dots \quad (1)$$

Для оценки адекватности служит критерий корреляционного уравнения

$$l_{h_1} = l_{h-1} - \frac{\Delta(h_1)^2}{\Delta(h_1-1)\Delta h_1},$$

где $\Delta(h)$ — соответствующие определители.

Рассмотрим составление корреляционных уравнений, описывающих зависимость зольности концентрата от некоторых факторов.

Плотность пульпы является одним из основных факторов, влияющих на качество конечных продуктов флотации. Большинство исследователей указывают на существование оптимума плотности при флотации [1,2]. Для установления оптимальных условий ведения процесса требуется математически описать зависимость $A_k^c = f(\delta)$. Экспериментальные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Плотность пульпы δ , г/л	50	55	70	90	120	170
Зольность концентрата A_k^c , %	7,2	7,16	7,3	7,9	8,55	9,5

В общем случае характер связи $A_k^c = f(\delta)$ с учетом (1) можно представить в виде полинома

$$\tilde{A}_k^c = \bar{A}_k^c + r_{j_1}^{(h)} \sigma_2 \quad (2)$$

того или иного порядка.

Здесь $\tilde{A}_k^c$ — вероятное значение зольности концентрата;

$\bar{A}_k^c$ — среднее значение зольности.

Все вычисления приведены в табл. 2. По данным табл. 2 (столбцы 2—8) получим корреляционное уравнение 1-го порядка

$$\tilde{x}_2 = \bar{x}_2 + r_k \frac{\sigma_2}{\sigma_1} (x_1 - \bar{x}_1),$$

или подставив численные значения, получим

$$\tilde{x} = 6,07 + 0,02x_1. \quad (3)$$

Для оценки линейности зависимости $A^c = f(\delta)$ вычислим критерий линейности и основную ошибку σ_{l_1}

$$l_1 = 1 - r_{j_1}^2 = 0,012;$$

$$\sigma_{l_1} = \sqrt{\frac{l_1}{n}} = 0,0447.$$

Определим отношение

$$\frac{l_1}{\sigma_{l_1}} = \frac{0,012}{0,0447} = 0,266.$$

Таблица 2

№ п/п	X_1	X_2	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$	x_1^3	x_1^4	$x_1^2 x_2$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1	50	7,2	-42,5	-0,735	1809	0,541	31,12	-72000	$327 \cdot 10^4$	-1385
2	55	7,16	-37,5	-0,775	1410	0,601	29,08	-52725	$199 \cdot 10^4$	-1093
3	70	7,3	-22,5	-635	506	0,403	14,29	-11410	$25,6 \cdot 10^4$	-321,4
4	90	7,9	-2,5	-0,035	6,25	0,00122	0,0875	-15,625	38,05	-0,23
5	120	8,55	+27,49	+0,6149	757	0,378	16,8	+20850	$57,3 \cdot 10^4$	456
6	170	9,5	+77,49	+1,564	6010	2,45	121,2	+467200	$3612 \cdot 10^4$	+9390
			-0,02	-0,0011	10498	4,374	212,57	+35,19 · 10 ⁴	$422,09 \cdot 10^5$	+7047
	$\bar{X}_1$ 92,5	$\bar{X}_2$ 7,935	—	—	$\mu_{2,0}$ 1749	$\mu_{0,2}$ 729	$\mu_{1,1}$ 35,44	$\mu_{3,0}$ 58667	$\mu_{4,0}$ $70,35 \cdot 10^5$	$\mu_{2,2}$ 1174,2
	—	—	$m_{1,0}$ -0,0033	$m_{0,1}$ -0,00018	σ_1 4,18	σ_2 +0,994	$r_{1,1}$ 0,994	$r_{3,0}$ 787	$r_{4,0}$ 2,25	$r_{2,1}$ 0,787

Следовательно, изучаемая зависимость $A_K^c = f(\delta)$ близка к линейной. Для того, чтобы более точно выразить рассматриваемую зависимость, составим корреляционное уравнение второго порядка.

Для нахождения корреляционного уравнения 2-го порядка произведем необходимые вычисления (табл. 2, столбцы 9—11)

$$a_1 = r_{1/0} - r_{1/0}^2 - 1 = 0,678;$$

$$b_1 = r_{1/0} - r_{1/0} \cdot r_{1/1} = 0,0129.$$

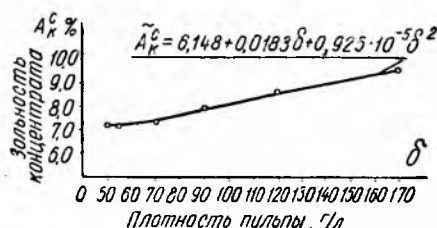


Рис. 1.

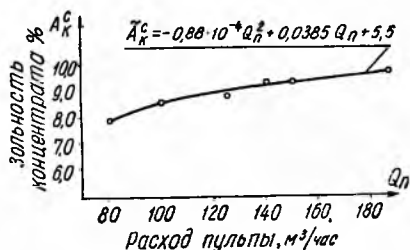


Рис. 2.

Определим критерий квадратичности

$$l_2 = l_1 - \frac{b_1^2}{a_1} = 0,01175; \quad \sigma_{l_2} = \sqrt{\frac{l_2}{n}} = 0,044;$$

$$\frac{l_2}{\sigma_{l_2}} = \frac{0,01175}{0,044} = 0,263.$$

Сравнивая величины l_1 и l_2 и их отношение к соответствующим основным ошибкам, наблюдаем незначительное снижение величины критерия корреляционного уравнения (0,266; 0,263). Это подтверждает и то, что во-первых, исследуемая зависимость $A_K^c = f(\delta)$ наиболее точно аппроксимируется корреляционным уравнением 2-го порядка, а, во-вторых, ввиду незначительного уменьшения критерия (0,003) можно остановиться на квадратичном уравнении.

В общем виде корреляционное уравнение 2-го порядка имеет вид (сравни с (1))

$$r_{1/1}^2 = r_{v1} \varepsilon_{(1)} + \frac{b_1}{a_1} (\xi_{1(1)}^2 - r_{3/0} \xi_{1(1)}) - 1. \quad (4)$$

После соответствующих математических преобразований уравнения (4) и подстановки полученного выражения в (2) получим

$$A_K^c = 6,148 + 0,0183\delta + 0,00000925\delta^2. \quad (5)$$

Вероятные значения зольности концентрата (A_K^c), вычисленные по уравнению (5), при данных значениях плотности пульпы (δ) приведены в табл. 3. Сравнивая их с наблюдаемыми значениями зольности, мы видим между ними практически полное совпадение (рис. 1).

По аналогичной методике была получена математическая зависимость зольности концентрата от расхода пульпы и расхода реагентов

$$A_K^c = 5,5 + 0,0385 Q_n - 8,2 \cdot 10^{-5} Q_n^2; \quad (6)$$

$$A_K^c = 7,17 + 0,8 Q_p - 0,074 Q_p^2. \quad (7)$$

Таблица 3

$\delta, \text{г/л}$	50	55	70	90	120	170
$A_K^c, \%$ Экспериментальное	7,2	7,16	7,3	7,9	8,55	9,5
$A_K^c, \%$ Расчетное	7,1	7,18	7,4	7,87	8,50	9,52

Эти зависимости изображены на рис. 2 и 3.

Математическое описание зависимости зольности концентрата от совместного влияния плотности и расхода пульпы и расхода реагентов $\tilde{A}_K^c = f(\delta, Q_n, Q_p)$ можно получить, воспользовавшись методом Брандона [3, 4]. Метод этот является разновидностью регрессионного анализа; он был предложен в 1959 году. Искомое уравнение связи можно представить в виде

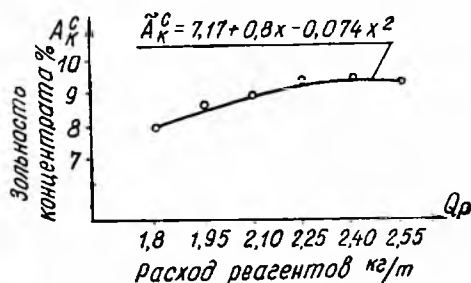


Рис. 3.

$$\tilde{A}_K^c = \bar{A}_K^c f_1(x_1) f_2(x_2) f_3(x_3), \quad (8)$$

где $f_i(x_i)$ — составляющие функции.

После соответствующих математических преобразований было получено уравнение множественной нелинейной регрессии

$$\tilde{A}_K^c = 8,69 (0,02768 + 0,0080\delta) (0,22101 + 0,0065Q_n) \times \\ \times (-0,1669 + 0,5916Q_p). \quad (9)$$

По описанному методу [4] можно найти зависимость (8) от неограниченного числа факторов, которые необходимо учесть.

ВЫВОДЫ

1. Полученные зависимости могут быть использованы при оптимизации флото процесса и создании систем автоматического управления процессом.

2. Уравнение множественной нелинейной регрессии может служить полной математической моделью процесса в статике.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Глембоцкий, В. И. Классен, И. Н. Плаксин. Флотация. Госгортехиздат, М., 1961.
2. В. И. Глембоцкий. Флотация угля. Госгортехиздат, М., 1963.
3. В. И. Ордынцев. Математическое описание объектов автоматизации. Изд-во «Машиностроение», М., 1965.
4. D. D. Brandon «AGJ Journal», 1959, V. 6, № 7.
5. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Госстатиздат, М., 1961.
6. Я. К. Лукомский. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. Госстатиздат, М., 1961.