К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

В. И. Салыга, Мэн Сянь-кан, Н. Р. Хаджиков
Харьков

Флотация — один из наиболее простых и эффективных методов очистки сточных вод. При прочих равных условиях она способствует ускорению процесса очистки отработанных, весьма устойчивых концентрированных масляных эмульсий цехов холодной прокатки более чем в сто раз по сравнению с существующим на металлургических заводах методом очистки в так называемых «конусах», основанным на разрушении структуры эмульсий серной кислотой и статическом отстаивании для отделения маслопродуктов [1].

Эффективность флотационной очистки эмульсионных стоков, как и у прочих флотопроцессов, зависит от многочисленных параметров. Основ-

ными из них являются физико-химические свойства очищаемых стоков, применяемый реагент и его расход, аэрация среды, время и схема флотации, а также состояние контактирования стоков с реагентами. Для действующей флотационной установки аэрация и время контактирования определяются конструктивными особенностями принятой флотомашины, размером контактного чана и могут быть приняты постоянными.

Состав эмульсионных стоков (pH, ионный состав, содержание нефтепродуктов, органических кислот и их мыл) зависит от технологии прокатки: степени обжатия, толщины полосы и марки прокатываемой стали, скорости прокатки и требуемой чистоты поверхности проката, вследствие чего изменение физико-химических свойств очищаемых эмульсионных стоков является случайным процессом.

Для получения стабильного качества очищенных вод при нестабильном исходном питании необходима разработка систем автоматического управления. Увеличение времени флотации означает уменьшение производительности агрегата, что крайне нежелательно. Кроме того, хороший эффект очистки с помощью регулирования времени флотации не всегда может быть достигнут. Поэтому в практике всегда стараются поддерживать постоянную нагрузку на флотомашину и управлять только изменением реагентного режима.

Определенные затруднения при автоматизации процесса флотационной очистки обусловлены недостаточной изученностью технологического режима как объекта автоматического управления. С целью создания условий для внедрения на действующих предприятиях систем автоматизации необходимо шире проводить математическое описание процессов флотационной очистки сточных вод.

Рассмотрим всю совокупность параметров, определяющих процесс очистки. В соответствии с характером и долей воздействия их можно разделить на следующий ряд групп.

1. Группа входных параметров $\{X\}$, которые качественно и количественно характеризуют эмульсионные стоки: количество стоков, подаваемых на флотацию, pH, щелочность, ионный состав, содержание нефтепродуктов в стоках.

2. Группа выходных параметров $\{V\}$, которые характеризуют качество очищенных вод — содержание нефтепродуктов в очищенной воде, ее pH, кислотность и др.

3. Группа управляющих параметров $\{q\}$, которая характеризует состояние управляющих воздействий, призванных поддерживать требуемый технологический режим — расход реагентов, время флотации и контактирования, степень аэрации и др.

4. Неконтролируемые возмущающие воздействия, к которым могут быть отнесены изменения характеристик технологического оборудования, присутствие случайных примесей в исходном питании и т. д. — например, изменение аэрации за счет изнашивания блока импеллера, изменение качества реагентов и др.

Систему уравнений связей основных параметров объекта можно представить в виде

$$\{V(t)\} = \varphi_0[\{X(t-\tau_1)\}, \{q(t-\tau_2)\}],$$
$$\{q(t)\} = \psi_0[\{X(t-\tau_3)\}], \quad (1)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 — величина запаздывания по соответствующему каналу. В уравнении (1) можно выделить четыре варианта взаимосвязи между различными группами параметров.

1. Зависимость выходных параметров V от входных X

$$\{V(t)\} = \varphi_1[\{X(t-\tau)\}] \quad (2)$$

дает возможность прогнозировать значение результативного признака V по данным значениям факториальных X. Обратная связь позволит выработать соответствующие ограничения на колебания входных параметров. Однако уравнения (2) не могут быть использованы при управлении процессом, так как большинство входных параметров недоступно регулировке (например, качество очищаемых стоков).

2. Зависимость выходных параметров V от управляющих q

$$\{V(t)\} = \varphi_2[\{q(t-\tau)\}] \tag{3}$$

позволяет в любой момент найти оптимальное значение управляющего параметра.

3. Зависимость управляющих параметров q от входных X

$$\{q(t)\} = \varphi_3[\{X(t-\tau)\}] \tag{4}$$

дает возможность определить наиболее вероятные значения управляющих воздействий q при определенных значениях входных параметров X.

4. Зависимость выходных параметров V от совместного действия группы входных X и управляющих параметров q

$$\{V(t)\} = \varphi_4[\{X(t-\tau)\}, \{q(t-\tau)\}] \tag{5}$$

учитывает действие всех параметров и, следовательно, дает наиболее полное математическое описание вышеуказанного процесса.

При описании процесса очистки необходимо учесть, что флотация представляет собой совокупность процессов столкновения масляных глобул с пузырьками воздуха и их прилипания с образованием прочих агрегатов пузырьки — глобулы, которые, в свою очередь, зависят от размера и количества пузырьков, времени нахождения пузырьков в камере машины, размера, формы и природы поверхности масляных глобул, условий их столкновения с пузырьками, интенсивности перемешивания и турбулентности потока в машине, способствующих отрыву глобулы от пузырьков и др. В реальной флотационной системе полидисперсность пузырьков и глобул, неоднородность условий столкновения и прилипания в разных зонах флотомашины, большое количество контролируемых и неконтролируемых возмущающих воздействий не позволяют найти функциональные зависимости процесса. В практике флотации основным источником информации при отыскании детального количественного описания следует считать данные, полученные экспериментальным путем. Если учесть, что в процессе флотации участвуют миллионы пузырьков и глобул, то флотопроцесс можно рассматривать как типично статистический и для практических целей удобнее пользоваться приближенным, статистическим описанием.

Связь между параметрами флотации проще всего найти с помощью корреляционных уравнений, представленных в виде полинома того или иного порядка [2, 3]

$$r_{\substack{j_1 \\ \bar{1}}}^{(h_1)} = \sum_{q_1=0}^{h_1} K_{q_1}^{h_1 \xi q_1}{}_{1(j1)}. \tag{6}$$

Коэффициент корреляции можно рассматривать как значение нормированной корреляционной функции при фиксированном τ-сдвиге между входным и выходным параметрами.

Коэффициенты $K_{q_1}^{h_1}$ можно определить методом наименьших квадратов

$$\sum_{j_1=1}^{k_1} P\left\{ r_{\substack{j_1 \\ \bar{1}}} - \sum_{0}^{h_1} K_{q_1}^{h_1 \xi q_1}{}_{1(j1)} \right\}^2 = \min. \tag{7}$$

Однако на практике метод наименьших квадратов оказывается очень неудобным, так как он не позволяет определить наилучшую форму исследуемой зависимости. Он дает наиболее вероятные значения коэффициентов уравнений принятого вида, каков бы ни был этот вид. В большинстве случаев перед вычислениями точный вид исследуемой зависимости неизвестен. Поэтому в процессе вычислений приходится повышать порядок корреляционного уравнения. В этом случае наиболее удобным следует считать применение методов, предложенных П. Л. Чебышевым. При определении корреляционного уравнения этим способом наблюдается незначительное увеличение вычислительной работы при переходе к полиномам более высокого порядка. В этом случае нахождение корреляционного уравнения по способу Чебышева можно представить в следующем виде:

$$r^{(h_1)}_{\substack{j_1\\ \overline{1}}} = r_{\substack{1\\ \overline{1}}}\xi_{1(j1)} + \frac{b_1}{a_1}\left(\xi^2_{1(j1)} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}}\xi_{1(j1)} - 1\right) +$$

$$+ \frac{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{vmatrix}}\left\{\xi^3_{1(j1)} - r_{\substack{4\\ \overline{0}}}\xi_{1(j1)} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}} - \frac{a_2}{a_1}\left(\xi^2_{1(j1)} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}}\xi_{1(j1)} - 1\right)\right\} + \ldots \qquad (8)$$

Для оценки адекватности служит критерий корреляционного уравнения

$$l_{h_1} = l_{h_1-1} - \frac{\Delta^{h_1^2}_{h_1}}{\Delta^{(h_1-1)}\Delta^{h_1}} \qquad (9)$$

с его основной ошибкой

$$\sigma_{l_{h_1}} = \sqrt{\frac{l_{h_1}}{n}}, \qquad (10)$$

где $\Delta^{(h)}$ — соответствующие определители.

В качестве примера рассмотрим составление корреляционных уравнений, описывающих зависимость остаточного содержания маслопродуктов в очищенной воде на выходе из флотомашины от колебания их исходной концентрации в очищаемых эмульсиях при стабильном реагентном режиме (50 *мл/л* отработанного травильного раствора). Экспериментальные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходная концентрация маслопродуктов в очищаемых эмульсиях, *г/л* (C_0)	5	10	20	30	50	75	100
Остаточное содержание маслопродуктов в очищенной воде, *мг/л* (C)	135	188	244	275	313	328	340

В общем случае характер связи (8) можно представить в виде полинома

$$\tilde{C} = \overline{C} + r^{(h)}_{\substack{j_1\\ \overline{1}}}\sigma_2, \qquad (11)$$

где $\tilde{C}$ — вероятностное значение остаточного содержания маслопродуктов в очищенной воде; $\overline{C}$ — среднее значение экспериментальных данных.

Зависимость $C = f(C_0)$ имеет нелинейный характер. Для установления порядка корреляционного уравнения применяем способ Чебышева. Все вычисления приведены в табл. 2.

$C_{0,г/л}$	X_1	X_2 (C, мг/л)	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2
5	1	135	—7	—125	49	15 625
10	2	188	—6	—72	36	5 184
20	4	244	—4	—16	16	256
30	6	275	—2	+15	4	225
50	10	313	2	+53	4	2 809
75	15	328	7	+68	49	4 624
100	20	340	12	+80	144	6 400
Σ	58	1823	+2	+3	302	35123
—	$\overline{X}_1 = 8{,}286$	$\overline{X}_2 = 260{,}43$	$m_{1/0}$ 0,2857	$m_{0/1}$ 0,4290	$m_{2/0}$ 43,143	$m_{0/2}$ 5017,6
—	8	260	6,56	70,835	43,061	5017,4

По данным табл. 2 вычисляем корреляционное уравнение второго порядка

$$r^2_{\substack{j_1\\ \overline{1}}} = r_{\substack{1\\ \overline{1}}}\xi_{1(j1)} + \frac{b_1}{a_1}\left(\xi^2_{1(j1)} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}}\xi_{1(j1)} - 1\right) =$$

$$= -0{,}5354\xi^2_{1(j1)} + 1{,}2077\xi_{1(j1)} + 0{,}535, \qquad (12)$$

где

$$\xi = \frac{X_1 - \overline{X}_1}{\sigma_1}\ ;\ a_1 = r_{\substack{4\\ \overline{0}}} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}} - 1 = 0{,}6119;\ b_1 = r_{\substack{2\\ \overline{1}}} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}}r_{\substack{1\\ \overline{1}}} = -0{,}3276.$$

Для оценки пригодности найденного уравнения (12) вычислим критерий квадратичности и его основную ошибку:

$$l_2 = l_1 - \frac{b_1^2}{a_1} = 0{,}03936;$$

$$\sigma_{l_2} = \sqrt{\frac{l_2}{n}} = 0{,}075.$$

Так как $\frac{l_2}{\sigma_{l_2}} = 0{,}56$, уравнение (12) не может точно выразить рассматриваемую зависимость. Переходим к вычислению уравнения третьего порядка, которое имеет вид

$$r^{(3)}_{\substack{j_1\\ \overline{1}}} = r_{\substack{1\\ \overline{1}}}\xi_{1(j1)} + \frac{b_1}{a_1}\left(\xi^2_{1(j1)} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}}\xi_{1(j1)} - 1\right) + \frac{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{vmatrix}} \times$$

$$\times \left\{ \xi^3_{1(j1)} - r_{\substack{4\\ \overline{0}}}\xi_{1(j1)} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}} - \frac{a_2}{a_1}\left(\xi^2_{1(j1)} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}}\xi_{1(j1)} - 1\right)\right\}, \qquad (13)$$

где

$$a_2 = r_{\substack{5\\ \overline{0}}} - r_{\substack{4\\ \overline{0}}} - r_{\substack{3\\ \overline{0}}} - r_{\substack{2\\ \overline{0}}} = 0{,}5896;$$

$$a_3 = r_{\substack{6\\ \overline{0}}} - r^2_{\substack{4\\ \overline{0}}} - r^2_{\substack{3\\ \overline{0}}} = 0{,}9216;$$

$$b_2 = r_{\substack{3\\ \overline{1}}} - r_{\substack{4\\ \overline{0}}}r_{\substack{1\\ \overline{1}}} = -0{,}2017.$$

Таблица 2

x_1x_2	x_1^3	x_1^4	$x_1^2x_2$	x_1^5	x_1^6	$x_1^3x_2$
875	—343	2401	—6125	—16807	117649	42 875
432	—216	1 296	—2592	—7776	46656	15552
64	—64	256	—256	—1024	4096	1 024
—30	—8	16	60	—32	64	—120
106	8	16	212	32	64	424
476	343	2 401	3332	16 807	117649	23 324
960	1728	20 736	11520	248 832	2 985 984	138 240
2883	1448	27122	6151	240032	3 272 162	221319
$m_{1/1}$ 411,86	$m_{3/0}$ 206,86	$m_{4/0}$ 3874,6	$m_{2/1}$ 878,71	$m_{5/0}$ 34,290	$m_{6/0}$ 467,452	$m_{3/1}$ 31,617
0,8858	169,89	3658,9	0,20488	28,925	413,357	1,5482

После соответствующего преобразования уравнения (13) получим

$$r_{\overline{j_1}}^{(3)} = 0{,}3228\xi_{1(j1)}^3 - 0{,}8704\xi_{1(j1)}^2 + 0{,}7721\xi_{1(j1)} + 0{,}67, \qquad (14)$$

где

$$\xi_{1(j1)} = \frac{X_1 - \overline{X}_1}{\sigma_1}.$$

Корреляционное уравнение будет иметь вид

$$\tilde{X}_2 = \overline{X}_2 + r_{\overline{j_1}}^{(3)}\sigma_2 = 260{,}43 + r_{\overline{j_1}}^{(3)}70{,}835.$$

Подставив в это уравнение численные значения, получим

$$\tilde{X}_2 = 0{,}0809X_1^3 - 3{,}443X_1^2 + 48{,}73X_1 + 94{,}71 \qquad (15)$$

или

$$\tilde{C} = 94{,}51 + 9{,}746C_0 - 0{,}1377C_0^2 + 0{,}000647C_0^3.$$

Для проверки точности найденного корреляционного уравнения вычислим критерий кубичности и его основную ошибку:

$$l_3 = l_2 - \frac{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}{a_1 \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{vmatrix}} = 0{,}00363;$$

$$\sigma_{l_3} = \sqrt{\frac{l_3}{n}} = 0{,}0235.$$

Так как значение отношения $\frac{l_3}{\sigma_{l_3}} = 0{,}15$ достаточно мало, уравнение (15) точно описывает зависимость $C = f(C_0)$. Сравнение расчетных и опытных значений C при различных C_0 приведено в табл. 3.

Таблица 3

C_0, г/л	C, мг/л	
	Расчетное	Опытное
5	138,8	135
10	178,9	188
20	239,6	244
30	280,5	275
50	318,4	313
75	324,5	328
100	339,2	340
Σ	1819,8	1823

Из табл. 3 видно, что между опытными и вычисленными по корреляционному уравнению значениями имеется практически полное совпадение.

Полученное корреляционное уравнение (15) дает возможность прогнозировать качество очищенной воды после флотации при нестабильном качестве исходной эмульсии.

По аналогичной методике могут быть получены зависимости остаточного содержания маслопродуктов в очищенной воде от расхода реагента Q_p и времени контактирования с реагентом.

ВЫВОДЫ

Корреляционные зависимости могут быть использованы при оптимизации процесса флотационной очистки сточных вод и создании системы автоматического управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Э. Левин. Сб. «Научные труды института «ВНИПИчерметэнергоочистка», вып. 11—12. Изд-во «Металлургия», 1968.
2. Я. К. Лукомский. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. Физматгиз, 1961.
3. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, 1961.

О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ШИХТОПОДГОТОВКИ НА КАЧЕСТВО АГЛОМЕРАТА

А. В. Савосюк
Киев

Повышение качества агломерата составляет мощный резерв увеличения производительности доменных печей и улучшения технико-экономических показателей доменного производства. Доменной технологией предъявляются жесткие требования: к качеству агломерата он должен иметь достаточно высокую прочность, кусковатость, пористость и восстановимость. Одной из важных качественных характеристик агломерата является его химический состав, современные требования к которому следующие: колебания содержания железа в агломерате не должны превышать $\pm 0{,}5\%$, а колебания основности агломерата—$\pm 0{,}025$ абс. ед. Все эти требования вытекают из необходимости обеспечения наибольшей интенсификации доменной плавки, но их выполнение связано с рядом затруднений производственно-технического характера. Получение агломерата определенного качества зависит от качества усреднения шихтовых материалов, поступающих на аглофабрику, качества подготовки аглошихты и выбора соответствующего теплового режима спекания шихты на агломашинах. Выполнение указанных требований технологического процесса агломерации гарантирует получение агломерата высокого качества.

Цель настоящей статьи* — на примере аглофабрики Макеевского металлургического завода (ММЗ) и аглофабрик № 2 и 3 Магнитогорского металлургического комбината (ММК) показать влияние условий шихтоподготовки на качество агломерата и указать пути повышения этого качества.

---

* Работа выполнена под руководством кандидата технических наук А. Г. Астахова.