

УДК 517.9, 004.032

ББК 78.34

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ БИОСОРБЦИИ СЕРЕБРА

Салихов З. Г.¹, Стрижко Л. С.², Новаковская А. О.³
(Московский институт стали и сплавов, Москва)

В работе рассматриваются особенности управления процессами извлечения серебра из вторичных растворов, основанными на отходах производства фармацевтической промышленности – биосорбентов. Математические модели, с помощью которых осуществляется прогноз состояний объекта управления, представлены в виде нейронов многослойной многоходовой нейросети, в которой переключение путей следования между слоями подчинено логическим правилам переключения технологических агрегатов. При этом предусматривается, что конкретные начальные условия задачи Коши присущи каждой точке переключения.

Ключевые слова: автоматизация, технические процессы, производство.

1. Основная часть

Современные условия экономической деятельности предприятий определили необходимость применения новых недорогих типов сорбентов, позволяющих значительно сократить

¹ Зуфар Гарифуллович Салихов, доктор технических наук, профессор, (ec.misis@mail.ru).

² Леонид Семенович Стрижко, доктор технических наук, профессор, (sls_2007.47@mail.ru).

³ Анна Олеговна Новаковская, аспирант, (my_anna@mail.ru).

себестоимость процесса извлечения серебра из вторичных растворов. К таким материалам относятся отходы производства антибиотиков, антагонистичные серебру, которые применяются в качестве биологических сорбентов. Актуальной является разработка системы управления, позволяющей эффективно использовать биосорбенты во вторичной металлургии. Целью настоящей работы является разработка основных положений системы управления технологической линией извлечения серебра из вторичных растворов.

На сегодняшний день более 60% серебра извлекается из вторичных видов сырья. Традиционно для извлечения серебра из вторичных растворов использовались специально изготовленные сорбенты – смолы, селективные по отношению к серебру. Стоимость этих сорбентов достигает 2,5–3 тысяч долларов за тонну. При этом каждая партия использованной смолы рассчитана на 8–10 циклов поглощения–извлечения (сорбция и десорбция) серебра. При такой стоимости и условиях использования смол извлечение серебра из вторичных растворов становится экономически неэффективным, так как себестоимость получения серебра выше цены его реализации. В последние годы распространение получили биологические сорбенты [2], представляющие собой отходы производства антибиотиков. Биосорбенты содержат остаточные культуры плесени, которые являются природными антагонистами серебру и способны активно поглощать серебро из вторичных растворов. Стоимость таких материалов составляет 40–60 долларов за тонну. Использование биосорбентов в процессах извлечения серебра из растворов потребовало системных решений, которые позволяли бы сократить себестоимость производства серебра за счет наиболее эффективного использования свойств сорбирующих материалов. Системный анализ процессов, протекающих в биосорбентах, показал, что в зависимости от вида плесневой культуры, сорбирующий материал может воспринимать и усваивать серебро в течение 2–3 часов. При этом серебро в гранулах сорбента находится в виде органических соединений. Прекращение подачи раствора в колонну, содержащую биосорбент, на 6–8 часов

приводит к тому, что усвоенное серебро металлизуется. При этом в течение указанного времени способность биосорбента усваивать серебро восстанавливается на 80–90%. При каждом последующем рецикле (сорбция – технологическая пауза) способность биосорбента усваивать серебро уменьшается на 10–20%. Из этого следует, что, в зависимости от вида плесневой культуры, биосорбент экономически целесообразно использовать до тех пор, пока способность усваивать серебро не снизится до 50% от первоначальной. После осуществленной серии рециклов производится извлечение серебра из гранул биосорбента – десорбция. Анализ физико-химических и биохимических особенностей описываемого процесса позволил принять гипотезу о том, что плесневая культура содержит два типа клеток. Первый тип клеток – материнский – способен выращивать семенной материал (споры), который развивается в восстанавливаемую биологическую популяцию. Второй тип клеток содержит активные центры, антагонистичные серебру, способные усваивать его из растворов. Составная часть рецикла – технологическая пауза – соответствует росту восстанавливаемой плесневой популяции. Уменьшение способности плесневой культуры поглощать серебро от рецикла к рециклу может рассматриваться как затухание биологической популяции, основные положения которой описаны уравнениями Лотки–Вольтерра.

Исходя из вышеизложенного, для прогнозирования состояний объекта управления – колонн, содержащих биосорбент, через которые протекает вторичный серебрясодержащий раствор с примесями, разработаны математические модели процесса биосорбции [3], восстановления биологической популяции [1], десорбции [4].

2. Уравнения процесса биосорбции

Уравнения, характеризующие основные показатели процесса биосорбции, представлены в виде блоков.

Блок изменения количества исходных веществ в циркулирующем растворе представлен уравнениями

$$(1) \quad \frac{dG^{Ag^+}}{dt} = \beta_2 F_2 \gamma_2 ([Ag^+]_2 - [Ag^+]_3) - g_1^{Ag^+} - g_2^{Ag^+} - g_3^{Ag^+},$$

$$(2) \quad \frac{dG^{AgNO_3}}{dt} = \beta_2 F_2 \gamma_2 ([AgNO_3]_2 - [AgNO_3]_3) - \chi_3^4 g_3^{Ag^+},$$

где $\frac{dG^{Ag^+}}{dt}$ – скорость изменения количества Ag^+ , кг/с; β – коэффициент массопереноса между зонами, м/с, параметр; F – площадь поверхности контакта зон, м²; γ_2 – плотность зоны, кг/м³; $[Ag^+]$ – весовые концентрации катионов серебра в зонах; g^{Ag^+} – скорость усвоения катионов серебра в реакциях (1)–(3), г/с.

Блок изменения количества активных центров биосорбентов представлен уравнениями вида

$$(3) \quad \frac{dG^{RCOOH}}{dt} = -\chi_1^3 g_1^{Ag^+},$$

где χ_j^i – коэффициенты стехиометрии компонент в реакциях; i – номер компоненты, $i = 1, 2, 3$; j – номер реакции, $j = 1, 2, 3$.

Расчет количества серебра, усваиваемого сорбентом в реакциях:

$$(4) \quad g_1^{Ag^*} = k_1 g_{np}^{Ag^+} e^{-\frac{E_1}{RT}}.$$

Расчет концентраций компонент в третьей зоне:

$$(5) \quad [Ag^+]_3(\tau_i) = [Ag^+]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{Ag^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau.$$

Плотность и вес зон рассчитывается следующим образом:

$$(6) \quad \gamma(\tau_i) = \gamma_{Ag^+} [Ag^+]_3(\tau_i) + \gamma_{NO_3^-} [NO_3^-]_3(\tau_i) + \gamma_{H^+} [H^+]_3(\tau_i) + \gamma_{RCOOAg} [RCOOAg]_3(\tau_i),$$

$$(7) \quad G(\tau_i) = \gamma_3(\tau_i) \cdot V_3.$$

Общее количество серебра, усвоенного сорбентом в колонне, рассчитывается по формуле

$$(8) \quad G^{Ag^+} = N \cdot G_{i,j}^{Ag^+},$$

где N – количество гранул.

В общем случае система обыкновенных дифференциальных уравнений, составляющая математическую модель процесса, после подстановки нелинейностей из расчета правых частей, зафиксированных в численной процедуре метода Рунге–Кутта, описывается нелинейными уравнениями общего вида:

$$\begin{aligned} \frac{dG_3^{Ag^+}}{dt} &= \beta_2 F_2 \gamma_2 ([Ag^+]_2 - [Ag^+]_3) - g_1^{Ag^+} - g_2^{Ag^+} - g_3^{Ag^+} = \\ &= \beta_2 F_2 \left(\gamma_{Ag^+} [Ag^+]_2 + \gamma_{NO_3^-} [NO_3^-]_2 + \gamma_{H^+} [H^+]_2 + \gamma_{OH^-} [OH^-]_2 \right) \times \\ &\times \left([Ag^+]_2 - [Ag^+]_3 \right) - k_1 g_{np}^{Ag^+} e^{-\frac{E_1}{RT}} - k_2 g_{np}^{Ag^+} e^{-\frac{E_2}{RT}} - k_3 g_{np}^{Ag^+} e^{-\frac{E_3}{RT}} = \\ &= \beta_2 F_2 \left(\gamma_{Ag^+} \left([Ag^+]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{Ag^+}}{dt} d\tau \right) + \right. \\ &\quad \left. + \gamma_{NO_3^-} \left([NO_3^-]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{NO_3^-}}{dt} d\tau \right) + \right. \\ &\quad \left. + \gamma_{H^+} \left([H^+]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{H^+}}{dt} d\tau \right) + \right. \\ &\quad \left. + \gamma_{OH^-} \left([OH^-]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{OH^-}}{dt} d\tau \right) \right) \times \\ &\times \left([Ag^+]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{Ag^+}}{dt} d\tau - [Ag^+]_3 + \frac{1}{\gamma_3 V_3} \int \frac{dG_3^{Ag^+}}{dt} d\tau \right) - \\ &- k_1 g_{np}^{Ag^+} e^{-\frac{E_1}{RT}} - k_2 g_{np}^{Ag^+} e^{-\frac{E_2}{RT}} - k_3 g_{np}^{Ag^+} e^{-\frac{E_3}{RT}}. \end{aligned}$$

Модель, с помощью которой осуществляется прогноз процесса биосорбции, состоит из системы, содержащей 17 обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих состояние процессов, протекающих в технологическом агрегате – колонне. Решение этой системы уравнений осуществляется методом Рунге–Кутта–Гилла четвертого порядка в пакете *MATLAB*. При этом расчет нелинейностей правых частей диф-

ференциальных уравнений типа (5) вынесен в отдельный блок. Параметрическая идентификация модели-структуры осуществляется методом Ньютона–Рафсона, при этом расчет приращений (оценок частных производных) осуществляется по экспериментальным данным [1] с помощью метода двух моделей и метода чувствительности. Расчет поверхности гранул плесневой культуры (биосорбента) осуществляется по биномиальному закону распределения.

Технологически процесс биосорбции осуществляется в последовательно соединенной серии колонн, установленных с понижением уровня каждой последующей, через которые серебро-содержащий раствор протекает самотеком.

Представленная математическая модель используется для прогнозирования кинетики процесса в каждой последующей колонне. При этом начальные условия задачи Коши соответствуют выходным показателям содержания серебра в растворе, выходящем из предыдущей колонны.

Аналогичным образом создана математическая модель восстановления активных свойств сорбента (регенерации технологических свойств) [1].

Уравнение роста активных центров:

$$(9) \quad \frac{dA_t}{dt} = r_n N_t \left(1 - \frac{P_t}{N_t} \right).$$

Уравнение роста центров размножения:

$$(10) \quad \frac{dP_t}{dt} = r_n N_t \left(1 - \frac{A_t}{N_t} \right),$$

$$(11) \quad r_n = k_4 \cdot e^{-\frac{E}{RT}},$$

где A_t – активные центры; P_t – центры размножения; N_t – количество центров плесневой культуры; r_n – скорость роста центров плесневой культуры, параметр.

Эта модель содержит восемь дифференциальных уравнений. Параметрическая идентификация и решение уравнений этой модели аналогичны методике решения уравнений модели сорбции.

Математическая модель извлечения серебра из биосорбента (десорбции), осуществляемая с помощью щелочных растворов, описывается уравнениями (12) и (13). Уравнение (12) показывает изменение количества десорбирующего раствора, а уравнение (13) – изменение количества сорбированного серебра.

$$(12) \frac{dG_1^{NH_4OH}}{dt} = g_{pr}^{NH_4OH} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([NH_4OH]_1 - [NH_4OH]_2),$$

где $\frac{dG_1^{NH_4OH}}{dt}$ – скорость изменения количества NH_4OH в 1 зоне,

кг/с; $g_{np}^{NH_4OH}$ – расход NH_4OH в циркулирующем растворе, кг/с;

β_1 – коэффициент массопереноса между 1 и 2 зонами, м/с, параметр; F_1 – площадь поверхности контакта зон, м²; γ_1 – плотность 1 зоны, кг/м³; $[NH_4OH]_1$, $[NH_4OH]_2$ – весовые концентрации NH_4OH в 1 и 2 зонах соответственно;

$$(13) \frac{dG_1^{[Ag(NH_3)_2]^+}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_2 ([Ag(NH_3)_2]_1^+ - [Ag(NH_3)_2]_2^+).$$

Эта модель содержит четырнадцать обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейными правыми частями. Процедуры решения уравнений модели и параметрической идентификации аналогичны модели процесса биосорбции.

Таким образом, перечисленные модели дают возможность прогнозировать состояния объекта управления для всех трех составляющих технологического цикла. Состояния совокупности технологических агрегатов, соединенных в последовательно-параллельную схему, могут быть представлены многослойной многовходовой нейросетью [4], в которой каждый слой соответствует отдельно взятому технологическому агрегату – колонне. Каждый нейрон слоя отражает состояние компонент технологического процесса, протекающего в данной колонне.

Между слоями существуют взаимосвязи, определяемые прохождением серебрясодержащего раствора, протекающего от колонны к колонне, и десорбирующего раствора.

Для управления технологическим процессом предусмотрено два уровня. На нижнем уровне осуществляется управление

кинетикой процессов, протекающих в каждой колонне. На втором уровне предусмотрено дискретное управление режимами переключения в соответствии с составляющими технологического цикла. Переключающее управление подается в соответствующие узлы нейронов определенных слоев нейросети, т.е. управляет изменением состояний объекта управления и переключением последовательностью нейронов и слоев нейросети.

Нейрон каждого слоя отражает изменения характеристик (состояний) в конкретной колонне. Узлы нейронов соответствуют состояниям, рассчитанным по итеративным процедурам в фиксированные моменты времени технологического цикла. Связь между слоями (нейрон связи) осуществляется по траекториям, соответствующим оценке состояний раствора, перетекающего из колонны в колонну. Технологически процесс реализуется в девяти колоннах, установленных на четырех уровнях. Колонны каждого уровня установлены с таким расчетом, чтобы раствор перетекал из колонны в колонну. На первом уровне установлено три колонны, на остальных – по две колонны. Исходя из физико-химических особенностей процессов, протекающих на технологическом участке, содержащем девять разноразмерных колонн, схема перетекания раствора из колонны в колонну подчинена логическому условию

$$(14) \forall A_{ij} \exists C_k (G_{ij}^{Ag}): A_{ij} \wedge A_{lm} \wedge A_{ns}, A_{ij} \notin C_k \Rightarrow G_{ij}^{Ag} = G_{ip}^{Ag},$$

где A_{ij} – номер колонны; C_k – технологический цикл; G_{ij}^{Ag} – количество серебра, усвоенного колонной; G_{ip}^{Ag} – предельное значение серебра, усвоенного сорбентом; i – номер уровня, $i = 1, \dots, 4$, $l \in i$, $m \in j$, $s \in j$; j – номер колонны, $j = 1, \dots, 9$; k – номер цикла, $k = 1, \dots, 6$.

Циклограмма, характеризующая последовательность соединения колонн, соответствует матрице смежности (таблица 1). Эта матрица отражает технологические особенности длительности процессов сорбции, восстановления активных свойств сорбента и десорбции.

Таблица 1. Матрица смежности технологических циклов

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Технологи- ческий цикл
1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	I цикл С1
2	0	1	0	0	0	1	0	1	0	
3	0	0	1	0	0	1	0	1	0	
4	0	0	0	1	0	0	1	1	0	
5	0	0	0	0	1	0	1	1	0	
1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	II цикл С2
2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
3	0	0	1	0	0	1	0	1	0	
4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	
5	0	0	0	0	1	1	0	1	0	
1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	III цикл С3
2	0	1	0	0	0	0	1	1	0	
3	0	0	1	0	0	0	1	0	1	
4	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
5	0	0	0	0	1	1	0	0	1	
1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	IV цикл С4
2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	
3	0	0	1	0	0	0	1	0	1	
4	0	0	0	1	0	0	1	0	1	
5	0	0	0	0	1	0	1	0	1	

1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	V цикл C5
2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	
3	0	0	1	0	0	1	0	0	1	
4	0	0	0	1	0	1	0	0	1	
5	0	0	0	0	1	0	0	1	0	
1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	VI цикл C6
2	0	1	0	0	0	0	1	1	0	
3	0	0	1	0	0	0	1	1	0	
4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	
5	0	0	0	0	1	1	0	1	0	

Режим переключения колонн каждого уровня по завершению процесса сорбции и переключению на режим восстановления активных свойств сорбента подчинен логическому правилу

$$(15) \quad \forall A_{ij} \quad \forall k \quad \exists G_{ij}^{Ag}(k) : G_{ij}^{Ag}(k) = G_H^{Ag}(k),$$

$$A_{ij} = A_{i+1,j} \vee A_{i,j+1},$$

где G_H^{Ag} – уровень насыщения биосорбента, прогнозируемый по модели.

Соответственно, после роста новой порции плесневой культуры, достаточной для продолжения технологического процесса биосорбции, осуществляется переключение колонн на биосорбцию согласно правилу

$$(16) \quad \forall A_{ij} \quad \forall k \quad \exists G_{i+1,j}^S(k) : (G_{i+1,j}^S(k) = D_{i+1,j}) \vee (G_{i,j+1}^S(k) = D_{i,j+1}(k)),$$

где $D_{i,j}$ – динамическая обменная емкость биосорбента, прогнозируемая по математической модели.

Предусмотрено, что порция биосорбента (плесневой культуры) используется до тех пор, пока способность поглощать

серебро после технологических пауз и определенного количества циклов (для каждого типа плесневой культуры) не понизится до уровня менее 50% от первоначальной. Это пороговое значение определяет эффективность использования биосорбента и, в зависимости от технологических условий, может быть ниже или выше. В соответствии с этим для колонн первых трех уровней (первой – седьмой) десорбция серебра и замена биосорбента в колонне подчинена логическим правилам

$$(17) \forall A_{ij} \forall k \exists G_{ij}^{Ag}(k) : G_{ij}^{Ag}(k) \leq 0,5G_{гр}^{Ag}, A_{ij} \notin C_k.$$

Восьмая – девятая колонны используются как вспомогательные, осуществляя доочистку растворов до норматива, соответствующего содержанию серебра в промышленных стоках. Замена сорбента в этих колоннах осуществляется через два–три раза после замены биосорбента в колоннах предыдущих уровней.

Функционирование системы управления предполагает, что идентифицированные математические модели вида (1)–(13) позволяют прогнозировать состояния объекта управления на каждый последующий момент времени. Каждый слой нейросети описывает процессы, протекающие в соответствующей колонне, включенной в технологический цикл согласно матрице смежности (таблица 1). Прогноз состояний в режиме биосорбции позволяет оценить количество активных центров, израсходованных на извлечение серебра. Если прогноз кинетики расходования активных центров биосорбента достигает заданного уровня, сигнал об этом состоянии поступает на второй уровень управления, где согласно логическому правилу (15) осуществляется переключение колонн в соответствии с матрицей смежности. При этом начальные условия задачи Коши поступают в точку переключения нейросети на другой слой в соответствии с прогнозом содержания серебра, выходящего из предыдущей колонны. Этот прогноз осуществляется по нейрону, соответствующему уравнению прогноза содержания серебра в растворе. После переключения нейронов соответствующего слоя на режим восстановления в этом слое согласно математической модели вида (9)–(11) осуществляется прогноз роста активных

центров биологической популяции. В этом слое связь между режимами сорбции и восстановления осуществляется по нейронам, прогнозирующим количество активных центров. По модели (9)–(11) рассчитывается количество восстановленных активных центров, данные о которых поступают на второй уровень системы управления. Если, согласно прогнозу по этой модели, достигнут заданный уровень роста активных центров, то по логическому правилу (16) со второго уровня поступает команда переключения колонны на режим сорбции в соответствии с матрицей смежности (таблица 1). В зависимости от типа биосорбента, каждый слой нейросети содержит 5–6 составных частей (циклов), прогнозирующих процессы сорбции и восстановления. Если после последнего цикла итоговая сорбционная способность биологических популяций снизилась ниже заданного уровня, со второго уровня согласно правилу (17) поступает команда переключения колонны на режим десорбции. В этом случае в данном слое нейросети функционируют нейроны, осуществляющие прогноз десорбции серебра согласно уравнениям типа (12)–(13). Кроме перечисленных особенностей функционирования нейросети, алгоритм второго уровня системы управления предусматривает связь между нейронами каждого слоя согласно логическому правилу (14).

Исходя из вышеизложенного, система управления второго уровня осуществляет переключение нейронов сети в соответствующих узлах каждого слоя.

3. Заключение

Научная новизна работы заключается в создании двухуровневой системы управления технологическим процессом биосорбции, в основу которой положено итеративное прогнозирование состояний объекта управления с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений, решение которых рассматривается как нейроны и их узлы. Методологически предусмотрено, что алгоритм второго уровня иерархии, согласно логическим

правилам и матрице смежности, предусматривает послойное переключение нейронов в фиксированных узлах нейросети.

Практическая значимость работы определяется возможностью эффективного использования биосорбентов на технологических участках, предназначенных для извлечения серебра из вторичных растворов.

Литература

1. КРИВОДУБСКИЙ О.А., НОВАКОВСКАЯ А.О. *Математическая модель восстановления активных свойств сорбента* // Информатика, кибернетика та обчислювальна техніка: сб. наук. пр. Донецького нац. технічного ун-ту. – 2009. Вып. 10 (153). – С. 251–254.
2. СТРИЖКО Л.С. *Металлургия благородных металлов*. – М.: МИСиС, 2001. – 336 с.
3. СТРИЖКО Л.С., ЛОЛЕЙТ С.И., НОВАКОВСКАЯ А.О. *Динамическая модель процесса биосорбции серебра* // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. –2009. – Вып. 4 (2009). – С. 55–60.
4. ХАЙКИН С. *Нейронные сети: полный курс*. – 2-е изд., испр. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – С. 1104.

NEURAL-NETWORK-BASED FORECATING MODEL FOR CONTROL OF SILVER BIOSORPTION PROCESSES

Zufar G. Salihov, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Leninskiy prospekt 4, (495)638-46-85, e-mail: ec.misis@mail.ru).

Leonid S. Strizhko, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Leninskiy prospekt 4, (495)638-46-85, e-mail: sls_2007.47@mail.ru).

Anna O. Novakovskaya, National University of Science and Technology “MISIS” (Moscow, Leninskiy prospekt 4, (495)638-46-85, e-mail: ec.misis@mail.ru).

Abstract: We study the specific features of control in course of silver biosorption from biosorbents – secondary solutions originated from pharmaceutical industry production wastes. The plant state forecasting model is implemented with a multi-layer multi-input neural network with inter-layer routing logic induced by logic of processing units switching. Existence of Koshi boundary conditions is assured at every switch point.

Keywords: automation, technology, manufacturing.

При этом предусматривается, что конкретные начальные условия задачи Коши присущи каждой точке переключения.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Н. Н. Бахтадзе*