

**Б.І. БАЙРАЧНИЙ**, докт. техн. наук, **Л.В. ЛЯШОК**, канд. техн. наук,  
**Т.М. ГОРОВА, Т.В. ОРЕХОВА**, НТУ “ХПІ”

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИЛУГОВУВАННЯ СРІБЛА**

В роботі представлена математична модель процесу селективного вилуговування срібного покриття з поверхні мідних сплавів. Розроблена математична модель дозволяє підібрати оптимальний склад розчину для селективного вилучення срібла, побудувати кінетичні залежності, на підставі яких можна прогнозувати швидкість вилучення срібла, запропонувати шляхи інтенсифікації та конструкції апаратів для проведення процесу вилуговування.

Mathematical model allows to choose optimum composition of solution for the selective leaching of silver, to build kinetic dependences on the basis of which it is possible to define speed process of leaching, to recommend the ways of intensification and construction of devises for conducting of process of leaching.

**Вступ.** Розвиток сучасної металургії дорогоцінних та рідкісних металів в Україні пов'язаний, перш за все, з розробкою нових та удосконаленням існуючих методів вилучення цінних компонентів з вторинної сировини, адже Україна не має власних природних запасів цих металів. Металовмісна вторинна сировина, з одного боку, завдає величезної шкоди навколишньому середовищу, з іншою – є ресурсом, який за вмістом корисних складових в сотні і тисячі раз перевершує природні джерела. Останні дослідження в галузі гідроелектрометалургії [1, 2, 3] свідчать про розвиток теоретичних основ процесів вилучення корисних компонентів з різних видів сировини. При цьому недостатня увага приділяється питанню їх математичного моделювання, яке б дозволило ефективно оптимізувати технологічні параметри проведення процесів на підставі основних фізико-хімічних залежностей.

**Математична модель.** Розглядається процес селективного вилучення (вилуговування) срібного покриття з поверхні мідних сплавів у розчині 14,56 моль/дм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1,02 моль/дм<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub>.

Вивчення кінетики хімічної реакції, що протікає при вилуговуванні, необхідно насамперед для того, щоб встановити граничну швидкість процесу та в багатьох випадках зробити висновки про її механізм, що дозволить керува-

ти процесом та розробити ефективну та економічну схему переробки вторинної сировини.

При створенні достовірної моделі слід перш за все виявити визначальні фактори, які впливають на поведінку системи, зробити математичний опис, який відображає механізм і закономірності впливу цих факторів при фіксації введених припущень.

При розробці математичної моделі були зроблені наступні припущення:  
- процес вилуговування відбувається за реакцією (1):



- змінення об'єму та теплоємності системи не враховується;
- реакція взаємодії срібла із сульфатною кислотою є формально простою, тобто підпорядковується закону діючих мас.

Математична модель хімічного процесу являє собою систему покомпонентних кінетичних рівнянь, які характеризують швидкість хімічного перетворення кожного з реагентів [4].

Швидкість реакції за даною речовиною уявляє собою змінення кількості цієї речовини за одиницю часу в одиниці реакційного простору.

Швидкість змінення кількості будь-якого  $i$ -того компоненту  $dc_i/dt$  описується співвідношенням [5]:

$$\frac{d\dot{n}_i}{dt} = g_i \times w, \quad (2)$$

де  $g_i$  – стехіометричний коефіцієнт при  $i$ -тому компоненті;  $w$  – швидкість реакції, яка визначається законом діючих мас:

$$w = k \times \dot{n}_a^{\nu_a} \times \dot{n}_b^{\nu_b}, \quad (3)$$

де  $k$  – константа швидкості реакції;  $\dot{n}_a^{\nu_a}, \dot{n}_b^{\nu_b}$  – концентрації реагентів у ступені їх стехіометричних коефіцієнтів.

Тоді математична модель реакції вилуговування срібла має вигляд:

$$\begin{aligned}
\dot{n}_{\text{H}_2\text{SO}_4} &= -2k \times \dot{n}_{\text{H}_2\text{SO}_4}^2 \\
\dot{n}_{\text{Ag}_2\text{SO}_4} &= k \cdot \dot{n}_{\text{Ag}_2\text{SO}_4} \\
\dot{n}_{\text{SO}_2} &= k \cdot \dot{n}_{\text{SO}_2} \\
\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}} &= 2k \times \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}^2
\end{aligned}
\tag{4}$$

Ця математична модель являє собою систему звичайних диференційних рівнянь. Для її вирішення доцільно скористатися методом Ейлера з постійним кроком інтегрування.

Для розрахунку константи швидкості реакції за сульфатною кислотою використовували інтегральний метод, відповідно до якого ліву частину кінетичного рівняння швидкості процесу (4) інтегрували від  $c_0$  до  $c$ , а праву – від 0 до  $t$ . Тоді рівняння для константи швидкості приймає вигляд:

$$k = \frac{1}{2t} \ln \frac{\dot{n}_0 - \dot{n}}{\dot{n}_0 \times \dot{n}} \tag{5}$$

Рівняння (5) уявляє собою пряму, яка проходить через початок координат, а тангенс куту нахилу цієї прямої до вісі абсцис буде дорівнювати константі швидкості реакції  $k$ .

Значення константа швидкості процесу при температурі 80 °С, за якої проводиться процес вилуговування, дорівнює 0,028 хв<sup>-1</sup>.

Технологічно направлений кінетичний аналіз визначає теоретичний оптимальний режим проведення реакції і буде використаний при виборі типу реактора для здійснення цієї хімічної реакції.

На підставі представленої математичної моделі можна побудувати ряд кінетичних кривих (рисунок), які дозволяють визначити концентрацію реагентів у будь-який момент часу, а, отже, прогнозувати хід процесу.

**Висновки.** В роботі представлена математична модель процесу селективного вилуговування срібного покриття з поверхні мідних сплавів. Розроблена математична модель дозволяє підібрати оптимальний склад розчину для

селективного вилучення срібла, побудувати кінетичні залежності, на підставі яких можна прогнозувати швидкість вилучення срібла, запропонувати шляхи інтенсифікації та конструкції апаратів для проведення процесу вилуговування.

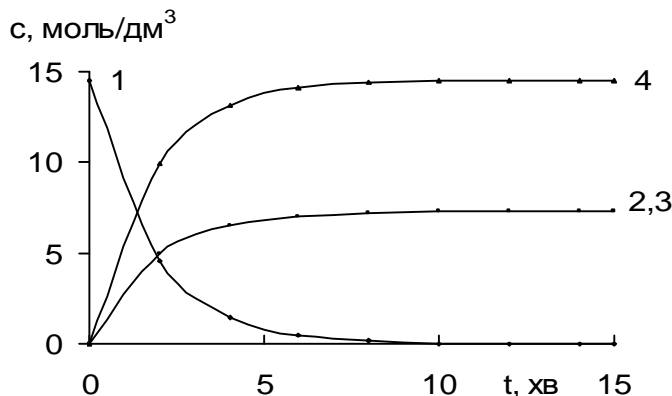


Рисунок – Кінетичні залежності змінення концентрації реагентів в процесі вилуговування срібла з поверхні мідних сплавів у розчині 14,56 моль/дм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1,02 моль/дм<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub>:  
1 – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 2 – Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 3 – SO<sub>2</sub>; 4 – H<sub>2</sub>O.

**Список літератури:** 1. Карпов Ю.А. Переработка вторичного сырья, содержащего драгоценные металлы. – М.: Гиналмазолото, 1996. – 290 с. 2. Благородные и редкие металлы: Сборник информационных материалов 3-й Международной конференции “Благородные и редкие металлы”. – Донецк, 2000. – 462 с. 3. Букин В.И. Переработка производственных отходов и вторичных сырьевых ресурсов, содержащих редкие, благородные и цветные металлы. М., 2002. – 556 с. 4. Царёва З.М., Товажнянский Л.Л., Орлова Е.И. Основы теории химических реакторов (компьютерный курс): Учеб. для химико-техн. спец. / Под ред. З.М. Царёвой. – Харьков: ХГПУ, 1997. – 624 с. 5. Лабораторный практикум по курсу «Компьютерные технологии»: Учеб. Пособие / Л.Л. Товажнянский, Т.Г. Бабак. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 232 с.

Надійшла до редколегії 05.04.08