УДК 622.775

*А.Е. РОГОВ, Е.А. РОГОВ*

# О НОВОЙ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИФФУЗИОННОГО РАСТВОРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИХ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ

Международная экологическая академия;
Казахский государственный университет им. аль-Фараби

*(Представлена академиком НАН РК Е.И. Роговым)*

## 1. Введение

При кучном выщелачивании (КВ) и подземном скважинном выщелачивании (ПСВ) металлов протекают совместно процессы диффузионного растворения и фильтрационного переноса в пористых средах штабеля и продуктивного пласта. При этом выходная функция содержания металла в продуктивном растворе (ПР) описывается сложной нелинейной зависимостью по времени $t$ вида [1]:

$$C_{\text{пр}}(t) = \frac{\hat{C}_{\text{пр}} \cdot e \cdot (t - t_з)}{T_з} exp\left(-\frac{t - t_з}{T_з}\right), \text{ мг/л,} \quad (1)$$

где $e$ – основание натурального логарифма, $e$ = 2,72; $\hat{C}_{\text{пр}}$ – максимальное содержание металла в ПР, при этом: $\frac{\partial C_{\text{пр}}(t)}{\partial t} = 0$; $t_з$ – время закисления ячейки, лет; $T_о$ – время достижения $\hat{C}_{\text{пр}}$, вторая кинетическая константа, лет.

Путем статистических наблюдений было подмечено, что величина $\hat{C}_{\text{пр}}$ достигается практически в каждой ячейке ПСВ урана и на опытных участках при одной и той же величине коэффициента извлечения, равном около 30% [1]. Этот факт требовал какого-либо теоретического обоснования, который нигде не обсуждался. В этой связи нами сделана попытка теоретическим путем объяснить новое свойство диффузионного растворения и фильтрационного переноса металлов при ПСВ.

## 2. Теория вопроса

Ранее в наших известных монографиях [1, 2] и статьях было показано, что коэффициент извлечения металла при ПСВ, а также и КВ хорошо описывается кривой:

$$\varepsilon(t) = 1 - \exp(-C_1 t), \quad (2)$$

где $C_1$ – некоторая постоянная для конкретных условий ячейки величина названная нами первой кинетической константой, 1/год.

Исходя из закона сохранения массы при извлечении металла способом ПСВ и КВ, нами было строго установлено соотношение:

$$T_о = \frac{1}{e \cdot C_1}, \text{ лет,} \quad (3)$$

где $T_о$ – время достижения максимума металла в ПР, которое названо нами второй кинетической константой ПСВ.

Определим по формуле (2) извлечение при времени $T_о$, получим:

$$\varepsilon(T_о) = 1 - exp\left(-\frac{1}{e}\right) = 1 - \frac{1}{e^{1/e}} = 0{,}304. \quad (4)$$

Из условия (4) вытекает новое объективное свойство диффузионного растворения металлов при ПСВ металлов.

Свойство. За период $T_o$ начала процесса диффузионного растворения металла до достижения максимума содержания его в ПР извлекается около 30% всего содержащегося в ячейке ПСВ или в лабораторном аппарате КВ – перколяционной колонне, металла при постоянном расходе выщелачивающих растворов за время $T_o$.

Для обоснования этого, на первый взгляд, необычного явления рассмотрим диффузионное растворение металла из кусков руды шаровой формы.

Пусть радиус шарика руды будет $R_ш$, тогда в нем содержится металла при его концентрации $C_o$, г/м$^3$:

$$M_ш = \frac{4\pi}{3} C_o \cdot \rho_п \cdot R_ш^3, \text{ г.} \quad (5)$$

Максимальная скорость диффузии металла достигается из поверхности шара $S_ш = 4\pi R^2$, м$^2$ с рудой.

По мере диффузии металла радиус шара, внутри которого имеется металл, будет уменьшаться. При этом путь диффундирующего металла к поверхности шара будет увеличиваться, а скорость диффузии будет уменьшаться.

Поставим условие, когда масса диффундируемого металла в сфере некоторой толщиной и внутреннего шара составляет 1 к 2, т.е. (рис. 1) $V_1 = 2V_2$.

Исходя из поставленного условия равенства масс для двух тел, получим уравнение:

$$\frac{4}{3}\pi \cdot R_ш^3 \cdot C_o \cdot \rho_п - \frac{4}{3}\pi \cdot R_1^3 \cdot C_o \cdot \rho_п = \frac{8}{3}\pi \cdot R_1^3 \cdot C_o \cdot \rho_п. \quad (6)$$

Решая уравнение (6) относительно $R_1$, получим простейшее выражение:

$$R_1 = 0{,}693 R_ш. \quad (7)$$

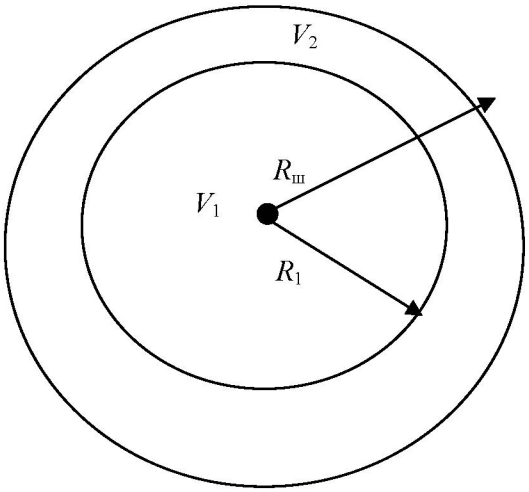


**Рис. 1.** К определению масс металла в сфере толщиной $m = R_ш - R_1$ и в шаре радиусом – $R_1$

Откуда толщина сферы $V_2$ будет:

$$m = 0{,}307 R_ш. \quad (8)$$

Из выражения (8) можно заключить следующее:

- за время $T_o$ весь металл диффундирует из сферы $V_2$ и составит порядка 30% от общей его массы в шаре;
- на границах поверхностей внутреннего шара $V_1$ и сферы $V_2$ скорость диффузии будет равна скорости фильтрационного массопереноса металла;
- в сфере $V_2$ скорость диффузии превышает скорость массопереноса путем смыва и фильтрации раствором металла, поэтому кривая $C_{пр}(t)$ на участке 0-Т быстро растет до максимума – $\hat{C}_{пр}$ (рис. 2);

- в шаре $V_1$ скорость диффузии меньше скорости фильтрации раствора, поэтому за счет его разжижения кривая продуктивности по времени $t$ имеет падающую кривую (рис. 2).

Рассмотренная интерпретация нового, ранее неизвестного явления может быть с успехом использована во многих практических действиях и расчетах при проектировании и управлении процессами КВ и ПСВ металлов.

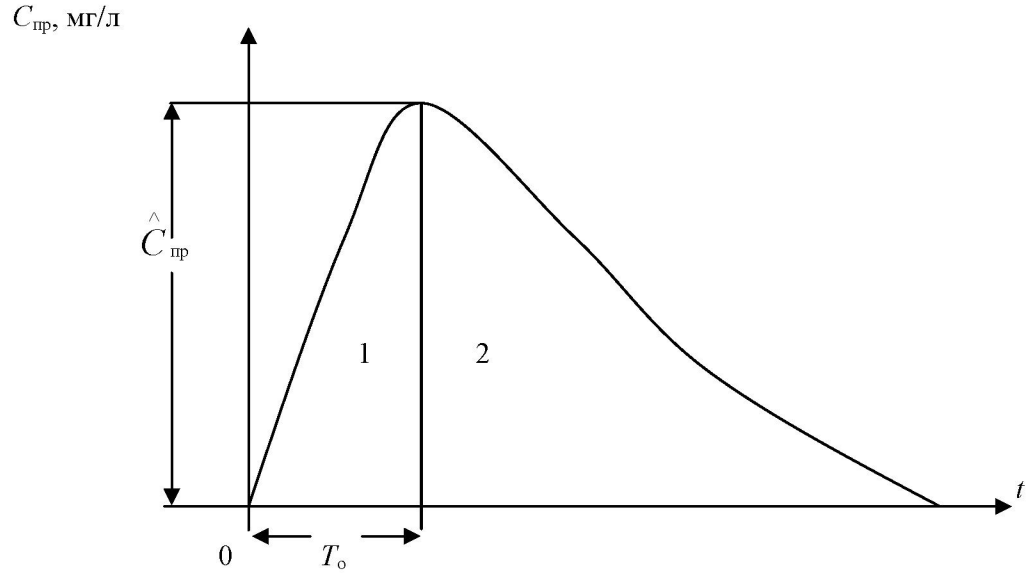


**Рис. 2.** Кривая 1 $C_{пр}(t)$

Приведем некоторые примеры, подтверждающие новое явление.

В монографии Толстова Е.А. [3] приводится пример кучного выщелачивания золота (стр. 265, рис. 6.5.2) цианированием рудной массы. Из этого примера видно, что максимум содержания золота в ПР достигается через 2 суток и составляет 1,9 г/л.

К этому моменту за двое суток извлекается ровно 30% золота. Обработкой статистических данных, приведенных [3], нами для этого случая получена следующая формула для определения коэффициента извлечения золота от времени:

$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{1}{e^{0,6 \cdot t}} - 0,4, \tag{8}$$

где $t$ – время в сутках.

Здесь $C_1 = 0,4$ при $T_o = 2$ сут. по формуле (8) получается:

$$\varepsilon(2) = 1 - \frac{1}{e^{0,6 \cdot 2}} - 0,4 = 0,3,$$

т.е. то значение – $\varepsilon$, которое и было достигнуто в эксперименте.

Второй пример, подтверждающий теоретическую модель диффузионного растворения металла, в частности, золота, из идеальной частицы – шара.

Исследовалась проба Т-4/1 из месторождения золота Тохтазан, расположенное в горах Киргизии [4].

Уравнение $\varepsilon(t)$ восстанавливалось нами по результатам выщелачивания золота цианированием на перкаляционной колонне [4].

Путем статистической обработки результатов выщелачивания было получено уравнение:

$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{1}{e^{0,32 \cdot t}} - 0,22. \tag{9}$$

Для проверки гипотезы было принято $\varepsilon(t) = 0,3$, тогда из уравнения (9) получим время достижения максимального содержания золота в ПР:

$$t_з = \frac{1}{0{,}32}\ell n\frac{1}{1-0{,}3-0{,}22} = 2{,}3$$

Это время совпадает с опытными данными.

Проверим извлечение по (9) через 10 суток:

$$\varepsilon(10) = 1 - \frac{1}{e^{0{,}32\cdot 10}} - 0{,}22 = 0{,}74,$$

что также совпадает с опытными данными [4].

И, наконец, через 4 суток было извлечено 50% золота из пробы. Проверим это по формуле (9):

$$\varepsilon(4) = 1 - \frac{1}{e^{0{,}32\cdot 4}} - 0{,}22 = 0{,}5.$$

Таким образом, теоретическая модель диффузионного растворения металла из частиц – шаров весьма удовлетворительно описывает процесс выщелачивания металлов.

В заключение следует отметить, что процессы КВ и ПСВ требуют более углубленного изучения с позиции взаимодействия диффузии и фильтрационного массопереноса металлов в пористых средах.

В дальнейших наших исследованиях была получена более точная формула для коэффициента извлечения металла в функции времени в виде [2]:

$$\varepsilon(t) = 1 - \left(1 + \frac{t - t_з}{T_o}\right) exp\left(-\frac{t - t_з}{T_o}\right), \tag{10}$$

где $t_з$ – время закисления блока или ячейки, лет; $T_о$ – вторая кинетическая константа, время достижения максимального значения содержания металла в продуктивном растворе из блока или ячейки, лет; $t$ – текущее время, лет.

Оценим величину критерия: извлечена $\varepsilon(t)$ для $t = T_о$ по формуле (10):

$$\varepsilon(T_o) = 1 - \left(1 + \frac{T_o - t_з}{T_o}\right) exp\left(-\frac{T_o - t_з}{T_o}\right). \tag{11}$$

По фактическим данным наблюдений при отработке блоков продуктивного пласта урана в регионе горных предприятий ПВ Казахстана можно утверждать:

$$t_з << T_o. \tag{12}$$

Кроме того, на интервале времени $t_з$ – замещения пластовых вод ВР в блоке продуктивного пласта можно считать, что:

$$C_{пр} = 0,$$

где $C_{пр}$ – концентрация металла в продуктивном растворе, мг/л.

В этой связи принимаем без особой погрешности:

$$t_з = 0. \tag{13}$$

Подставляя (13) в уравнение (11), получим:

$$\varepsilon(T_o) = 1 - \frac{2}{e} = 1 - 0{,}73 = 0{,}29. \tag{14}$$

Следовательно, по двум различным формулам для $\varepsilon(t)$ получен достаточно одинаковый результат. При достижении максимального содержания металла в продуктивном растворе (ПР) на откачных скважинах достигается тридцатипроцентное его извлечение.

Это уникальное свойство ПСВ металлов позволяет сделать фундаментальные выводы:

- тридцатипроцентное извлечение металла достигается за время, равное достижению максимума содержания его в ПР;
- этот показатель может приниматься за тестовый. Так, имеем для любой ячейки:

$$0{,}3\cdot n\cdot R_o^2\cdot m\cdot \varepsilon_п = T_o\ \cdot \overline{C}_{пр}\cdot Q_o, \tag{15}$$

где $n$ – геометрический параметр ячейки (2,6; 2,0; 1,6); $R_о$ – радиус ячейки, м; $m$ – продуктивность пласта, кг/м$^2$; $\varepsilon_п$ – проектное значение коэффициента; $\overline{C}_{пр}$ – среднее содержание металла в ПР за время $T_о$, лет; $Q_о$ – общий дебит ПР, м$^3$ за время $T_о$.

Из формулы (15) легко вычислить время $T_o$:

$$T_o = \frac{0{,}3 \cdot n \cdot R_o^2 \cdot m \cdot \varepsilon_п}{\overline{C}_{пр} \cdot Q_o}, \text{ лет.} \qquad (16)$$

Уравнение (16) позволяет теоретически определить величину второй кинетической постоянной уже во время проектирования.

Понятно, что для этого необходимо знать $Q_o$ и $R_o$:

$$Q_o = 365 \frac{1{,}157 \cdot 2\pi \cdot K_ф \cdot M_э \cdot N_{ос} \left(n \cdot S_н + S_o\right)}{10^2 \left(\ell n \frac{R_o}{R_c} + S_к\right)}$$

или

$$Q_o = 26{,}52 \frac{\overline{K}_ф \cdot M_э \cdot N_{ос} \left(n \cdot S_н + S_o\right)}{\ell n \frac{R_o}{R_c} + S_к}, \quad м^3 \qquad (17)$$

$R_o$ – оптимальный радиус ячейки определяется по нашим формулам для различных геометрических форм [1]; $\overline{K}_ф$ – среднее для блока значение коэффициента фильтрации продуктивного пласта, м/сут; $M_э$ – эффективная мощность продуктивного пласта, м; $N_{ос}$ – число откачных скважин в блоке; $S_н$ – динамический напор, компрессия на ЗС, м вод.ст.; $S_o$ – депрессия на ОС, м вод.ст.; $n = \frac{N_{зс}}{N_{ос}}$ – параметр отношения числа ЗС в блок к числу ОС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогов Е.И., Язиков В.Г., Рогов А.Е. Математическое моделирование в горном деле (геотехнология металлов), Алматы, 2002, Lem, 214 с.

2. Язиков В.Г. и др. Геотехнология металлов. Алматы, 2005, 365 с.

3. Толстов Е.А. Физико-химические геотехнологии. М., МГТУ – 1999, 312 с.

4. Исследования по цианидному выщелачиванию технологических проб Т-4 и Т-6 руды месторождения Тохтазан на бутылочном агитаторе и в колоннах. Отчет ЦНИЛ АО "КГРК", г. Кара-Балта, 2003 г.

*Рогов А.Е., Рогов Е.А.*

МЕТАЛДАРДЫ СІЛТІСІЗДЕНДІРУ КЕЗІНДЕГІ ДИФФУЗИЯЛЫҚ ЕРУІНІҢ ЖАҢА ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ ТУРАЛЫ

*Rogov A.E., Rogov E.A.*

THE NEW LAW DIFFUSION DISSOLUTION OF METALS AT THEIR ALKALIS