

УДК 622.775

Е. И. РОГОВ, А. Е. РОГОВ

## К ТЕОРИИ ПОДЗЕМНОГО СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Изложены теоретические основы диффузионного переноса растворов при подземном скважинном выщелачивании металлов.

**Введение.** Процессы добычи полезных ископаемых физико-химическими геотехнологиями в принципе отличаются от классических горных технологий открытой и подземной добычи. Классические технологии вот уже на протяжении многих столетий не отличаются новизной. Как и прежде, открытые горные работы требуют разрушения и перемещения огромных объемов горных пород в виде вскрыши, которые складываются на поверхности земли.

Подземные горные работы предполагают проведение целой сети горно-капитальных и подготовительных выработок. Это также связано с разрушением и перемещением вначале под землей, а затем на поверхность огромных объемов горных пород.

В то же время физико-химические геотехнологии металлов, например урана, требуют только бурения сети технологических скважин – закачных и откачных. При этом из большого спектра растворяемых компонентов переработке (сорбции) подвергаются только те металлы, например, уран, которые добывают. Все остальные растворенные компоненты отправляются опять в подземное пространство.

Колоссальные объемы горных пород, исчисляемые миллиардами тонн перерабатываются классическими горными технологиями. При этом расходы на процессы добычи, обогащения и переработку полезных ископаемых в кондиционные продукты растут по нелинейной и возрастающей почти по экспоненциальной зависимости. Подземное скважинное выщелачивание во многом облегчает добычу полезных компонентов из недр земли, т.к. позволяет избавиться, первое и самое главное, от присутствия людей под землей и от громадных объемов горных работ.

**Теория проблемы.** Нет сомнений в том, что минимизация сроков отработки любого участка

или блока является главной целью управления геотехнологией горного производства при подземном скважинном выщелачивании металлов и любых других полезных ископаемых.

Примем за основу теоретических исследований полученную нами функцию содержания урана или любого металла в продуктивном растворе в откачной скважине [1]:

$$C_{\text{пр}}(t) = \frac{\hat{C}_{\text{пр}} \cdot e \cdot (t - t_3)}{T_1} e^{-\frac{(t-t_3)}{T_1}}, \text{ мг/л}, \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время, лет;  $T_1$  – время достижения максимального содержания металла в продуктивном растворе (ПР), сут;  $t_3$  – время закисления или вытеснения выщелачивающим раствором пластовых вод в разовом объеме эффективной пористости пород продуктивного пласта, лет;  $\hat{C}_{\text{пр}}$  – максимальное значение содержания металла в ПР, мг/л.

Параметры  $t_3$  и  $\hat{C}_{\text{пр}}$  определены нами теоретически и имеют аналитические решения [1].

Время  $t_3$  – закисления ячеек зависит от геометрии ячейки и ее радиуса.

Гексагональная ячейка:

$$t_3 = \frac{160 \cdot R_o^2 \cdot \bar{K}_\Pi}{\bar{K}_\Phi \cdot n_r \cdot S_n \cdot \lambda m \left( \lambda m \frac{R_o}{R_c} \right)}, \text{ сут.} \quad (2)$$

Квадратная ячейка:

$$t_3 = \frac{174 \cdot R_o^2 \cdot \bar{K}_\Pi}{\bar{K}_\Phi \cdot n_k \cdot S_n \cdot \lambda m \left( \lambda m \frac{R_o}{R_c} \right)}, \text{ сут.} \quad (3)$$

Прямоугольная ячейка при  $b = 2a$ , где  $b$  – расстояние между откачным и закачным рядом и  $a$  – расстояние между откачными скважинами в ряду, м:

$$t_3 = \frac{144 \cdot R_o^2 \cdot \bar{K}_n}{\bar{K}_\phi \cdot n_p \cdot S_n \cdot \lambda m \left( \lambda m \frac{R_o}{R_c} \right)}, \text{ сут.} \quad (4)$$

Здесь в формулах (2), (3) и (4) обозначены параметры:  $R_o$  – оптимальный радиус ячейки, м [1];  $R_c$  – радиус скважины, м;  $\bar{K}_n$  – среднее значение эффективной пористости в ячейке или блоке, доли ед.;  $\bar{K}_\phi$  – среднее значение – математическое ожидание коэффициента фильтрации раствора в пористой среде продуктивного пласта в ячейке или блоке, м/сутки;  $n_r, n_k, n_p$  – безразмерный параметр отношения числа закачных скважин к числу откачных в блоке;  $S_n$  – динамический напор на закачных скважинах, м вод. ст.

Параметр  $\hat{C}_{np}$  определяется по нашей формуле [1]:

$$\hat{C}_{np} = \frac{36,7 \cdot \theta_j \cdot R_o^2 \cdot \lambda m \left( \lambda m \frac{R_o}{R_c} + S_k \right) \cdot \bar{m} \cdot C_1}{n_j \cdot \bar{K}_\phi \cdot \bar{M}_3 (S_n + S_o)}, \quad (5)$$

где  $\theta_j$  и  $n_j$  – безразмерные параметры для различных схем вскрытия блоков, в частности:

– для гексагональной сети:

$$\theta_j = n_j = 2,6;$$

– для квадратной сети:

$$\theta_j = n_j = 2,0;$$

– для прямоугольной (рядной) сети при  $b = 2a$ :

$$\theta_j = n_j = 1,6;$$

$\bar{m}$  – среднее значение продуктивности пласта, кг/м<sup>2</sup>;  $S_k$  – показатель скин-эффекта, безразмерная величина;  $S_o$  – депрессия на откачной скважине, м вод. ст.;  $\bar{M}_3$  – среднее значение эффективной мощности продуктивного пласта, м;  $C_1$  – параметр кинетики выщелачивания металла, при этом [1]:

$$C_1 \cdot T_1 = \frac{1}{e} \quad (6)$$

или

$$C_1 = \frac{1}{e \cdot T_1}, \text{ 1/год.} \quad (7)$$

Нами ранее было доказано, что срок отработки любой ячейки или блока при ПСВ металлов до проектного значения извлечения –  $\varepsilon_n$  определяется по формуле:

$$T_3 = 365 \cdot T_1 \lambda m \frac{1}{1 - \varepsilon_n}, \text{ сут.} \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что для достижения максимально возможной скорости отработки ячейки или блока необходимо минимизировать кинетический параметр  $T_1$  – время достижения максимума содержания металла в ПР.

Процесс ПВ металлов состоит из двух взаимозависимых этапов. Первый этап – диффузионное растворение металла реагентами в определенной среде по параметру –  $pH$  – кислотной или щелочной.

Второй этап – фильтрационный перенос металла в растворе от закачных скважин к откачным по сложным трубкам (линиям) тока в пористой среде продуктивного пласта мощностью  $M_3$ .

Время диффузионного растворения металла определяется по нашей формуле [2]:

$$t_0 = \frac{\lambda^2 \cdot \lambda m \frac{8 \cdot C_o}{C_{np} \cdot \pi^2}}{D_{np} \cdot \pi^2}, \text{ сут.} \quad (9)$$

где  $2\sqrt{2l}$  – размер толщины пласта или диаметра шара породы, из которой выщелачивается металл, см;  $C_o$  и  $C_{np}$  – первоначальное и конечное содержание металла в рудах, доли ед.;  $D_{np}$  – эффективный коэффициент диффузионного растворения металла в реагенте, см<sup>2</sup>/сут.

Из уравнения (10) следует, что сократить время диффузионного растворения можно только двумя способами:

– уменьшить параметр  $2\sqrt{2l}$ ;

– увеличит  $D_{np}$ .

Однако, следует заметить, что при ПСВ металлов из естественно залегающих пластово-инфильтрационных месторождений, например, урана, рения и других металлов управлять размерами  $2\sqrt{2l}$  просто невозможно.

Рассмотрим параметр  $D_{np}$ . Согласно известным классическим работам А. Эйнштейна коэффициент диффузии определяется по формуле:

$$D_{np} = \frac{R \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot N \cdot r \cdot \eta}, \quad (10)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $N$  – число Авагадро;  $r$  – радиус молекул металла, диффундирующего в раствор;  $\eta$  – вязкость растворителя.

Анализ формулы (10) показывает, что в принципе  $D_{\text{п}}$  для ПСВ металлов является неуправляемой величиной, так как только повышая температуру, можно добиться эффекта сокращения времени  $t_o$ . Но, понятно, что прогреть громадные объемы продуктивных пластов просто не только не эффективно, но и даже не осуществимо вследствие огромных затрат тепловой энергии.

Следовательно, время  $t_o$  диффузионного растворения металла может быть уменьшено только за счет соответствующих коридоров  $pH$  и  $EH$  в выщелачивающих растворах:

$$\left. \begin{array}{l} pH \leq PH \leq \hat{pH} \\ \downarrow \\ EH \leq EH \leq \hat{EH} \end{array} \right\} \quad (11)$$

Экспериментальным путем доказано [2], что с увеличением расходов реагентов, например серной кислоты, на период времени  $T_1$  при ПСВ урана, величина  $T_1$  может быть существенно уменьшена. Тогда в соответствии с формулой (8) будет сокращаться срок отработки ячейки или блока до  $\varepsilon_{\text{п}}$ .

Зависимость параметра  $T_1$  от концентрации кислоты –  $K_o$  в период  $(0-T_1)$  описывается простейшей статистической кривой:

$$T_1 = a - bK_o + CK_o^2, \text{ сут}, \quad (12)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – статические коэффициенты, которые определяются в лабораторных условиях на элементарных трубках тока.

Уравнение (12) имеет один минимум в точке:

$$\frac{\partial T_1}{\partial K_o} = 0 \quad (13)$$

или

$$-b + 2CK_o = 0,$$

откуда получается:

$$K_o = \frac{b}{2C}, \text{ г/л}. \quad (14)$$

Величина  $K_o$  в период  $(0-T_1)$  является оптимальной с позиции минимизации сроков отработки блоков и рекомендуется для ПСВ металлов.

Рассматривая второй этап ПСВ металлов – фильтрационный перенос растворенного металла в пористой среде, следует отметить, что время выщелачивания металла в ячейке или блоке вычисляется по нашей формуле [1]:

$$T_o = \frac{\eta_j \cdot R_o^2 \cdot \rho_{\text{п}} \cdot f_{\text{п}}}{\rho_p \cdot \beta_{\text{п}} \cdot \bar{K}_{\text{ф}} \cdot (n_j \cdot S_{\text{п}} + S_o) \cdot \mathcal{M} \left( \lambda m R_o / R_c \right)}, \quad (15)$$

сут,

где  $\eta_j$  – численный параметр для гексагональной сети;  $\eta_{\text{т}} = 160$ ; для квадратной –  $\eta_{\text{к}} = 174$ ; для прямоугольной при  $b = 2a$   $\eta_{\text{т}} = 144$ ;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пород продуктивного пласта, т/м<sup>3</sup>;  $\rho_p$  – плотность ВР, т/м<sup>3</sup>;  $f_{\text{п}}$  – проектное значение параметра Ж:Т – отношения жидкого к твердому при ПСВ металла из блока, безразмерный параметр;

$\beta_{\text{п}} = \frac{0,675}{f_{\text{п}}}$  – параметр отношения средней скорости выщелачивания  $\bar{V}_v$  к средней скорости фильтрации  $\bar{V}_{\text{ф}}$  ВР в пористой среде:

$$\beta_{\text{п}} = \frac{V_v}{V_{\text{ф}}} < 1; \quad (15)$$

$n_j$  – параметр отношения числа закачных к числу откачных скважин в блоке, безразмерный.

Из уравнения (15) следует, что после того, как установлен оптимальный радиус ячейки –  $R_o$  [1] единственным и эффективным способом уменьшения времени отработки ячейки или блока является повышение динамического напора –  $S_{\text{п}}$  на закачных скважинах до определенных достижимых пределов  $\hat{S}_{\text{п}}$ , м вод. ст.

Таким образом, теоретический анализ двух стадийного гетерогенного процесса ПСВ металлов, в частности, урана, рения указывает на две фундаментальные зависимости (14) и (15), которые определяют оптимальную с позиции времени отработки стратегию:

- на интервале времени  $(0-T_1)$  необходимо обеспечивать концентрацию раствора, в частности, серной кислоты при ПСВ урана  $K_o$ , г/л;
- на интервале времени  $(0-T_1)$  необходимо достигать максимально-возможные динамические напоры на закачных скважинах;
- в дальнейшем на  $t > T_1$  следует уменьшать подачу реагента и снижать динамический напор на ЗС по оптимальной стратегии [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рогов Е.И., Язиков В.Г., Рогов А.Е.* Математическое моделирование в горном деле. Алматы: Lem, 2002. 214 с.
2. *Рогов Е.И., Рогов А.Е.* К вопросу определения оптимального диаметра куска руды при кучном выщелачивании. В сб. трудов ИГД им. Д. А. Кунаева. Т. 69. С. 107-109.
3. *Рогов Е.И., Рогов А.Е.* Обоснование напоров на технологических скважинах при добыче урана // ДАН РК. 2005. № 3. С. 47-51.

Резюме

Металдарды жерасты ұңғылап сілтілеу кезіндегі ерітіндінің диффузиялық берілуінің теоретикалық негіздері жарияланған.

Summary

Theoretical bases of diffusion movement of solutions at underground hole metal leaching is given.

*Поступила 2.05.07г.*