

*А.Е. РОГОВ, Е.А. РОГОВ, Л.Б. САБИРОВА*

(Институт Горного дела имени Д.А.Кунаева, г.Алматы)

## **УПРОЩЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПСВ МЕТАЛЛОВ**

*Представлена академиком НАН РК, д.т.н., проф. Роговым Е.И.*

### **Аннотация**

В данной статье сделана попытка упростить и сократить объемы вычислений для проектирования и управления геотехнологией ПСВ металлов, которые содержат большое количество параметров.

**Ключевые слова:** подземное скважинное выщелачивание, пластовые воды, критерий надежности.

**Кілт сөздер:** жерасты ұңғымалық сілтілеу, тақталы сулар, сенімділік критерийі.

**Keywords:** in-situ leaching, formation water, the reliability test.

Ранее полученные аналитическим путем многочисленные формулы для проектирования и управления геотехнологией ПСВ металлов содержат большое количество параметров.

Однако ясно, и это подтверждено нами опытом длительных расчетов, что некоторые параметры входной информации или их комбинации слабо влияют на результат, поэтому такие параметры следует считать без потери точности расчетов заданными для многих различных условий. Это свойство расчетных моделей позволит формулы упростить и сократить объемы вычислений.

Ниже приводим основные параметры, входящие в расчетные формулы и их условные обозначения.

Далее примем необходимые определения, обозначения и сокращения по тексту статьи:

ВР

Выщелачивающие растворы

ЗС	Закачные скважины
ОС	Откачные скважины
ПВ	Подземное выщелачивание
ПР	Продуктивные растворы
ПСВ	Подземное скважинное выщелачивание
ТС ПСВ	Технологическая схема подземного скважинного выщелачивания
$K_{\phi}$ , м/сут	Коэффициент фильтрации рудовмещающего пласта, продуктивного горизонта в пределах месторождения, блока, элементарной ячейки
$n$	Отношения числа закачных скважин к числу откачных скважин в блоке, ячейке
$S_n$ , м вод.ст.	Компрессия (напор) на закачных скважинах
$S_o$ , м вод.ст.	Депрессия на откачной скважине
$R_c$ , м	Радиус технологической скважины
$x$ , м	Длина линии тока в элементарной ячейке
$\overline{K_n}$	Среднее значение коэффициента эффективной пористости продуктивного горизонта
$N_{oc}$	Число откачных скважин, одновременно находящихся в работе
$N_{zc}$	Число закачных скважин, одновременно находящихся в работе
$f$ , т/т	Отношение жидкого к твердому по массе, величина безразмерная
$\beta = \frac{\overline{V}_e}{\overline{V}_\phi} < 1$	Отношение средней скорости выщелачивания $\overline{V}_e$ урана к средней скорости фильтрации $\overline{V}_\phi$ раствора в пористой среде пласта
$A_{сут}$ , кг	Суточная производительность рудника по концентрату
$H$ , м	Глубина технологических скважин
$C_{скв}$ , \$/м	Стоимость 1 м пог. сооружения и обвязки технологических скважин
$N_{эу}$	Число эксплуатационных участков на месторождении
$M_э$ , м	Эффективная мощность продуктивного горизонта
$\overline{m}_я$ , кг/м <sup>2</sup>	Средняя продуктивность рудного тела (пласта) в пределах ячейки
$\frac{K_{\phi 1}}{K_{\phi}}$	Отношение коэффициента фильтрации прифилтровой зоны к коэффициенту фильтрации продуктивного горизонта в пределах ячейки

$\frac{R_1}{R_c}$	Отношение радиуса прифльтровой зоны к радиусу скважины
$\alpha$	Параметр, определяющий геометрию ячейки
$\rho_n, \text{т/м}^3$	Плотность пород продуктивного пласта
$Q_{oc}, \text{м}^3/\text{сут}$	Дебит откачной скважины
$Q_{zc}, \text{м}^3/\text{сут}$	Дебит закачной скважины
$T_э, \text{сут}$	Срок эксплуатации блока, участка.
$\overline{V}_\phi, \text{м/сут}$	Действительная средняя характерная для элементарной ячейки скорость фильтрации по любой линии тока.
$T_э, \text{сут}$	Время закисления ячейки радиусом $R_o$ .
$R_o, \text{м}$	Оптимальный радиус ячейки.
$a, \text{м}$	Расстояние между скважинами в ряду.
$b, \text{м}$	Расстояние между рядами скважин.
$\xi$	Параметр для прямоугольной ячейки при $1 < \xi$ ; $\xi = b/a$ .
$Q_U, \text{кг}$	Запасы урана в ячейке.
$C_э, \text{\$/год}$	Эксплуатационные затраты на один блок в год.
$\varepsilon$	Коэффициент извлечения урана, доли ед.
$f = (Ж : Т)$	Отношение жидкого к твердому в ячейке или блоке за любой период времени.
$C_1, T_0$	Первая и вторая кинетические константы

Будем рассматривать следующие природные параметры:

$$\rho_n, \overline{K}_\phi, S_k : \rho_n, \overline{K}_n \quad (1)$$

и технологические параметры:

$$C_1, R_o, S_n, S_o, R_c, \varepsilon_n, n_r, n, T_0, f, \beta$$

$$n_r = \{2,6; 2,0; 1,6; 1,3\} \quad (2)$$

$$n = \frac{N_{zc}}{N_{oc}} \text{ в блоке, при } S_{\text{бл}} \geq S_{\text{кр}} \quad n = n_r.$$

Из них сильно меняющиеся:

$$K_\phi \leq K_\phi \leq \hat{K}_\phi; S_n \leq S_n \leq \hat{S}_n; n = \frac{N_{zc}}{N_{oc}}. \quad (3)$$

Отметим ряд закономерностей для ПСВ.

1. При увеличении  $\overline{K_\phi}$  в блоке, ячейке на  $\delta \cdot \overline{K_\phi}$  параметр  $T_0$ ,  $C_1$  уменьшаются обратно пропорционально на ту же величину, параметр:  $f=(Ж : T)$  растет пропорционально на  $\delta \cdot \overline{K_\phi}$  а параметр  $\beta$  уменьшается.

2. При увеличении напора  $S_H$  и  $S_0$  в блоке на  $\delta \cdot (S_H + S_0)$  параметры  $T_0$  и  $\beta$  уменьшаются на ту же величину  $\delta$ .

3. С увеличением коэффициента извлечения металла на любую величину  $\beta$  и  $T_0$  уменьшаются по логарифмическому закону а параметр  $f$  возрастает по такому же закону.

4. При увеличении радиуса ячейки  $R$  в блоке параметры  $\beta$  и  $T_0$  увеличиваются по квадратичному закону, а параметр  $f$  уменьшается по такому же закону.

5. Вторая кинетическая константа  $T_0$  не зависит от величины скин-эффекта  $S_K$ , тогда как параметр  $\beta$  возрастает с ростом  $S_K$ , а  $\beta$  убывает по сложной зависимости.

6. Зависимость  $\ln(\ln \frac{R_0}{R_c})$  практически остается постоянной величиной на всем интервале  $R - \hat{R}$  и равной величине 1,85.

7. Геометрический параметр  $n_r$  зависит только от типа ячейки, а параметр  $n$  зависит от площади блока и  $n$  становится равной  $n_r$  при площади блока, большей или равной критической.

8. Параметр  $\rho_n$  изменяется в узких пределах и практически мало влияет на технологические  $T_0$ ,  $C_1$ ,  $f$  и  $\beta$ .

Примем постоянными следующие параметры:  $\rho_n=1,65 \text{ т/м}^3$ ;  $n = n_r = \{2,6; 2,0; 1,6; 1,3\}$   
 $\varepsilon_n=0,9$ ;  $\ln \frac{R_0}{R_c}=0,65$ ;  $S_0=0,1$   $S_H$ ;  $f = \frac{0,675}{\beta}$ .

Ранее нами были получены следующие аналитические формулы для определения основополагающих геотехнологических параметров ПСВ металлов:

$$T_0 = 0,16 \frac{R_0^2 \cdot \rho_n \cdot f}{\beta \cdot \overline{K_\phi} \cdot (n \cdot S_H + S_0) \left[ \ln \left( \ln \frac{R_0}{R_c} \right) \right] \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_n}} ; \quad (4)$$

$$f = 72,4 \frac{\overline{K_\phi} \cdot (n \cdot S_H + S_0) \cdot T_0 \cdot \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_n}}{n_r \cdot R_0^2 \cdot \left( \ln \frac{R_0}{R_c} + S_K \right) \cdot \rho_n} ; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{0,93}{10^2} \cdot \frac{n_r \cdot R_0^2 \left( \ln \frac{R_0}{R_c} + S_K \right) \cdot \rho_n}{\overline{K_\phi} \cdot (n \cdot S_H + S_0) \cdot T_0 \cdot \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_n}} ; \quad (6)$$

$$C_1 = 0,06 \frac{\beta \cdot \overline{K_\phi} \cdot (n \cdot S_H + S_0) \left[ \ln \left( \ln \frac{R_0}{R_c} \right) \right] \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_n}}{\rho_n \cdot R_0^2 \cdot f} . \quad (7)$$

Принимая во внимание стабильность отмеченных ниже параметров и конструкций из них, запишем целый ряд полученных нами упрощенных формул:

$$T_0 = 0,091 \frac{R_0^2 \cdot f^2}{K_\phi \cdot (n_r + 0,1) S_H}, \text{ лет} \quad (8)$$

$$f = 100,9 \frac{\overline{K_\phi} \cdot ((n_r + 0,1) T_0)}{n_r \cdot R_0^2 \cdot \ln \frac{R_0}{R_c} + S_k}; \quad (9)$$

$$\beta = 0,007 \frac{n_r \cdot R_0^2 (\ln \frac{R_0}{R_c} + S_k)}{\overline{K_\phi} \cdot (n_r + 0,1) S_H \cdot T_0}, \quad (10)$$

$$C_1 = 0,11 \frac{K_\phi (n_r + 0,1) S_H}{R_0^2 \cdot f^2}, \text{ 1/сут.} \quad (11)$$

где  $n_r = 2,6$  – гексагональная ячейка,  $n_r = 2,0$  – квадратная,  $n_r = 1,6$  – прямоугольная при  $b=2a$ .

#### Дебиты технологических скважин

$$Q_{oc} = 0,073 \frac{\overline{K_\phi} \cdot \overline{M_\gamma} \cdot (n_r + 0,1) \cdot S_H}{\ln \frac{R_0}{R_c} + S_k}, \text{ м}^3/\text{сут}; \quad (12)$$

$$Q_{zc} = 0,073 \frac{\overline{K_\phi} \cdot \overline{M_\gamma} \cdot n_r \cdot S_H}{\ln \frac{R_0}{R_c} + S_k}, \text{ м}^3/\text{сут.} \quad (13)$$

**Средняя действительная скорость фильтрации ВР по любой линии тока длиной  $R_k$  в ячейке**

$$V_\phi = 0,021 \frac{(n_r + 0,1) \cdot S_H \cdot \overline{K_\phi}}{\overline{K_{II}} \cdot R_k}, \text{ м/сут.} \quad (14)$$

где  $\overline{K_{II}}$  определяется экспериментально через фиксированное время закисления ячейки или блока –  $T_3$

$$\overline{K_{II}} = \theta \cdot \frac{T_3 \cdot \overline{K_\phi} \cdot S_H \cdot n_r}{R_0^2}, \text{ доли ед,} \quad (15)$$

где  $\theta = 0,011$  – гексагональная ячейка,

0,011 – квадратная,

0,012 – прямоугольная.

### Время отработки ячейки или блока – $T_{\text{э}}$ .

Гексагональная:

$$T_{\text{э}} = 186,5 \frac{R_0^2 \cdot f^2}{(n_{\text{г}} + 0,1) \cdot S_{\text{H}} \cdot K_{\phi}}, \text{сут}; \quad (16)$$

Квадратная:

$$T_{\text{э}} = 203 \frac{R_0^2 \cdot f^2}{(n_{\text{кв}} + 0,1) \cdot S_{\text{H}} \cdot K_{\phi}}, \text{сут}; \quad (17)$$

Рядная при  $b=2a$ :

$$T_{\text{э}} = 167 \frac{R_0^2 \cdot f^2}{(n_{\text{р}} + 0,1) \cdot S_{\text{H}} \cdot K_{\phi}}, \text{сут}. \quad (18)$$

где  $n_{\text{г}}$ ;  $n_{\text{кв}}$ ;  $n_{\text{р}} = \frac{N_{\text{зс}}}{N_{\text{ос}}}$ .

$$T_{\text{э}} = 2,3 \cdot e \cdot T_0 \cdot \ln \frac{1}{1 - \varepsilon_{\text{н}}}, \text{лет}; \quad (19)$$

### Математическая модель концентрации продуктивного раствора на ОС от $t$ :

$$C_{\text{пр}}(t) = \frac{2,9 \cdot m \cdot \beta (\ln \frac{R_0}{R_c} + S_{\kappa}) R_0^2}{Q_{\text{ос}}} \cdot \frac{[1 - \exp(-C_y t)]}{t}, \text{мг/л}; \quad (20)$$

где  $m$  – продуктивность пласта,  $\text{кг/м}^3$ .

Максимальное значение металла в ПР через  $T_0$ .

$$\hat{C}_{\text{пр}} = \frac{37,7 \cdot \alpha \cdot C_1 \cdot m \cdot R_0^2 \cdot \ln \frac{R_0}{R_c}}{K_{\phi} \cdot M_{\text{э}}(n + 0,1) S_{\text{H}}}, \text{мг/л}; \quad (21)$$

где для гексагональной ячейки:  $\alpha=2,6$ ; для рядной сети  $\alpha=1,2$ .

Среднее значение содержания металла в ПР за время  $T_{\text{э}}$ .

$$\overline{C}_{\text{пр}} = \frac{365 \cdot e \cdot T_0 \cdot \hat{C}_{\text{пр}}}{T_{\text{э}}}, \text{мг/л}. \quad (22)$$

### Оптимальный радиус ячейки.

Гексагональная:

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{S_{\text{бл}}(n+1) \cdot H \cdot C_{\text{скв}} \cdot \overline{K_\phi} \cdot S_H(n+0,1)}{523 \cdot f^2 \cdot C_\Omega}}, \text{ м}; \quad (23)$$

Квадратная:

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{S_{\text{бл}}(n+1) \cdot H \cdot C_{\text{скв}} \cdot \overline{K_\phi} \cdot S_H(n+0,1)}{437 \cdot f^2 \cdot C_\Omega}}, \text{ м}; \quad (24)$$

Рядная при  $b=2a$ :

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{S_{\text{бл}}(n+1) \cdot H \cdot C_{\text{скв}} \cdot \overline{K_\phi} \cdot S_H(n+0,1)}{270 \cdot f^2 \cdot C_\Omega}}, \text{ м}. \quad (25)$$

На этом заканчиваем обзор для справок самых важных формул, которые мы упростили без потери необходимой точности расчетов.

Уравнение концентрации металла в растворе на откачной скважине [2]:

$$C_{\text{np}}(t) = \frac{e(t-t_3) \cdot \exp\left[-\frac{t-t_3}{T_O}\right] \cdot 98 \cdot \overline{m} \cdot R_0^2 \cdot \left(\ln \frac{R_O}{R_C} + \overline{S_\kappa}\right)}{T_O \cdot \overline{K_\phi} \cdot \overline{M_\Omega} (n \cdot S_H \cdot S_O)}, \text{ мг/л}; \quad (26)$$

где  $t_3$  – время закисления, лет.

Параметр скин-эффекта имеет вид:

$$\overline{S_\kappa} = \left(\frac{K_\phi}{K_1} - 1\right) \cdot \ln \frac{R_O}{R_C}. \quad (27)$$

Далее положим  $n = n_r$ ;  $S_o=0,1$   $S_H$  и  $t_3 \rightarrow 0$  (28)

по отношению к  $T_O$  и  $T_\Omega$ , тогда из (26) получим:

$$C_{\text{np}}(t) = \frac{e \cdot \exp\left[-\frac{t}{T_O}\right] \cdot t}{T_O} \cdot \frac{98 \cdot \overline{m} \cdot R_0^2 \cdot \left(\ln \frac{R_O}{R_C} + \left(\frac{K_\phi}{K_1} - 1\right) \cdot \ln \frac{R_1}{R_C}\right)}{\overline{K_\phi} \cdot \overline{M_\Omega} (n_r + 0,1) \cdot S_H}, \text{ мг/л}. \quad (29)$$

Иначе можно записать для скин-эффекта [2]:

$$S_\kappa(t) = a\sqrt{t-2}. \quad (30)$$

где  $a$  – статический параметр.

Параметр  $n_r = \{2,6; 2,0; 1,6\}$  (31)

определяет геометрию ячейки [2]. Подставляя (30) и (31) в (29) получим более простые формулы:

для гексагональной ячейки  $n_r=2,6$ :

$$C_{np}(t) = 36,3 \cdot \frac{e \cdot t \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right) \right] \cdot R_0^2 \cdot \left( \ln \frac{R_0}{R_C} + a\sqrt{t} - 2 \right)}{\overline{K_\phi} \cdot \overline{M_\varepsilon} \cdot S_H}, \text{ мг/л.} \quad (32)$$

Для квадратной  $n_r=2$ :

$$C_{np}(t) = 37 \cdot \frac{e \cdot t \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right) \right] \cdot R_0^2 \cdot \left( \ln \frac{R_0}{R_C} + a\sqrt{t} - 2 \right)}{\overline{K_\phi} \cdot \overline{M_\varepsilon} \cdot S_H}, \text{ мг/л.} \quad (33)$$

Для прямоугольной  $b=2a$   $n_r=1,6$ :

$$C_{np}(t) = 35,5 \cdot \frac{e \cdot t \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right) \right] \cdot R_0^2 \cdot \left( \ln \frac{R_0}{R_C} + a\sqrt{t} - 2 \right)}{\overline{K_\phi} \cdot \overline{M_\varepsilon} \cdot S_H}, \text{ мг/л.} \quad (34)$$

Произведем проверку: пусть  $t = T_0$ ;  $R_0 = 50\text{м}$ ;  $R_C = 0,08\text{м}$ ;  $K_\phi = 8\text{м/сут}$ ;  $M_\varepsilon = 6\text{м}$ ;  $S_H = 100$  м.вод.ст.

Имеем для гексагона:  $T_0 = 0,6\text{м}$ ,  $\alpha = 2,5$

$$C_{np}(t) = \frac{36,3 \cdot e \cdot T_0^{0,6} \cdot e^{-1} \cdot 250 \cdot \left( \ln \frac{50}{0,06} + 2,5\sqrt{0,6} - 2 \right)}{6 \cdot 8 \cdot 6}, \text{ мг/л.}$$

$$C_{np}(t) = 51,4 \cdot (6,7 + 0) = 344,5, \text{ мг/л}$$

## ЛИТЕРАТУРА

1 Язиков В.Г., Рогов Е.И., Забазнов В.Л., Рогов А.Е. Геотехнология металлов. Алматы, FORTRESS, 2005, 392с.

2 Рогов А.Е., Рыспанов Н.Б. Математические основы геотехнологии. Алматы, FORTRESS, 2007, 368с.

## REFERENCES



1 Yazikov V.G, Rogov E.I., Zabaznov B.L., Rogov A.E, Geotechnology of metals. Almaty, FORTRESS, 2005, 392p.

2 Rogov E.A., Ryspanov. N.B. Mathematical foundations of Geotechnology. Almaty. FORTRESS, 2007, 368 p.

## Резюме

*A.E. Rogov, E.A. Rogov, L.B. Sabirova*

(Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен институты, Алматы қаласы)

### МЕТАЛДАРДЫ ЖЕРАСТЫЛЫҚ ҰҢҒЫМАЛАРМЕН СІЛТІЛЕУ ГЕОТЕХНОЛОГИЯСЫ ҮШІН

#### НЕГІЗГІ ЕСЕПТЕУ ФОРМУЛАЛАРЫН ЫҚШАМДАУ

Бұл мақалада металдарды жерастылық ұңғымалармен сілтілеу геотехнологиясын жобалау және басқару үшін есептеулер көлемін қысқарту мен ықшамдауға амал жасалынды.

Ұзақ есептеулер тәжірибесінде кіріс ақпараттарының кейбір параметрлері немесе олардың әрекеттері есептеу нәтижелеріне әсері аз, сондықтан мұндай параметрлерді әртүрлі шарттар үшін есептеу дәлдігін жоғалтпайды деп есептеуге болады.

**Кілт сөздер:** жерасты ұңғымалық сілтілеу, тақталы сулар, сенімділік критерийі.

## Summary

*A.E. Rogov, E.A. Rogov, L.B. Sabirova*

(Mining Institute after D.A.Kunaev, Almaty)

### SIMPLIFICATION OF THE BASIC CALCULATION FORMULAS

## FOR METALS DRILLHOLE ISL GEOTECHNOLOGY

The attempt to simplify and reduce the calculations volume for the metals drillhole ISL geotechnology design and management which contain a large number of parameters is made in article.

By us by the experience of long calculations confirmed that some of the parameters of input information or their combination affect scarcely on the result, therefore, these parameters should be count without loss of accuracy of calculations set for many different conditions.

**Keywords:** in-situ leaching, formation water, the reliability test.

*Поступила 09.07.2013 г.*