УДК 622.775

А.Е. РОГОВ

К ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ РАСТВОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ГРАВИТАЦИИ

Международная экологическая академия

(Представлена академиком НАН РК Е.И. Роговым)

1. Введение

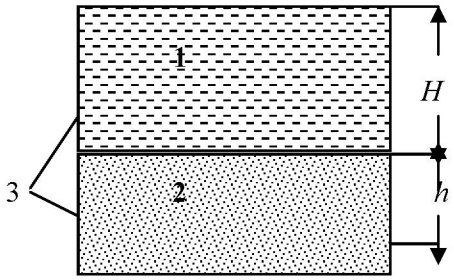
При подземном скважинном выщелачивании (ПСВ) металлов силы гравитации оказывают существенное влияние на геотехнологические параметры. Известно, что вследствие положительной разницы между удельным весом растворов $\gamma_р$ и пластовых вод – $\gamma_в$ возникает вертикальная составляющая ламинарной скорости фильтрации растворов до определенного нижнего водоупора.

Если нижний водоупор находится на значительном > 50 м расстоянии от почвы продуктивного пласта, то без специальных мер будет происходить потеря в большом объеме реагента, в частности, серной кислоты и металла (урана). Это явление «тонущих» растворов может привести к полной потере металла, т.е. к остановке рудника.

В этой связи теоретическое обоснование параметров фильтрации растворов в пористой среде под действием сил гравитации является весьма актуальной проблемой при ПСВ металлов. Анализ литературных источников [1, 2, 3] показал, что этой проблеме почти не уделено внимания , за исключением известной нашей монографии [2].

2. Теоретические положения

Рассмотрим простейшую схему фильтрации жидкости, например, воды через пористую среду под действием сил тяжести (рис. 1)



1 – жидкость; 2 – пористая среда; 3 – непроницаемые стенки;
H – гидравлический уклон на H пути фильтрации L.

Рис. 1. К фильтрации жидкости через пористую стену

Эта простейшая схема фильтрации характерна для случая, когда происходит инфильтрация воды или раствора через перемычку 2.

В этом случае движение жидкости подчиняется закону Дарси (линейная фильтрация), согласно которому будем иметь скорость расхода воды под напором H в виде:

$$V = \frac{H \cdot K_ф}{L}, \text{ м/сут.,} \qquad (1)$$

где $K_ф$ – коэффициент фильтрации среды 2, м/сутки; H – разница в отметках начала и конца пути, м; L – длина пути, м.

Из формулы (1) можно записать:

$$K_ф = \frac{L \cdot V}{H}, \text{ м/сут.} \qquad (2)$$

Следует заметить, что из (2) легко определить фактический $K_ф$ для любых условий, замерив всего три параметра: L, H и V.

Нас интересует, прежде всего, фильтрация флюидов в пористых средах продуктивных пластов, заполненных пластовыми водами.

В этой связи под действием сил гравитации опускание растворов происходит только за счет разницы удельных весов выщелачивающих и продуктивных растворов (ВР и ПР) и воды. При этом скорость опускания (фильтрации) ВР и ПР имеет вид:

$$V_z = \frac{\gamma_р - \gamma_в}{\gamma_в} \cdot \frac{K_{фв}}{K_п}, \tag{3}$$

где $\gamma_р$, $\gamma_в$ – удельный вес ВР И ПР и воды соответственно, т/м^3; $K_{фв}$ – вертикальный коэффициент фильтрации продуктивного пласта, м/сут.; $K_п$ – эффективная пористость пласта, доли ед.

Обозначив $\gamma_р - \gamma_в = \Delta\gamma$ и $\gamma_в = 1$ т/м^3, имеем $K_{фв} = \theta K_{фг}$ [3], где $\theta < 1$.

Из (3) получим:

$$V_z = \frac{\Delta\gamma\theta \cdot K_{фг}}{K_п}, \text{ м/сут.}, \tag{4}$$

где $K_{фг}$ – горизонтальный коэффициент фильтрации пласта, м/сут.

По нашим данным [1, 2] можно принимать:

$$K_{фв} = (0{,}1 \div 0{,}25) \cdot K_{фв}. \tag{5}$$

Далее рассмотрим наиболее характерные ситуации при ПСВ металлов, когда нижний водоупор имеется частично – $x_{1.1}$ на p % от площади блока или даже полностью $x_{1.2}$ на всей площади отрабатываемого блока, т.е. имеем:

$$X_1 = \{x_{1.1.}; x_{1.2}\}. \tag{6}$$

Состояния ЗС и ОС отобразим на множестве X_2:

$$X_2 = \{x_{2.1}; x_{2.2}; x_{2.3}; x_{2.4}\}, \tag{7}$$

где $x_{2.1}$ – все ЗС и ОС находятся в работе; $x_{2.2}$ – все ЗС и ОС остановлены; $x_{2.3}$ – часть ЗС остановлены; $x_{2.4}$ – часть ОС остановлены.

Отобразим множества X_1 и X_2 на квазиупорядоченном графе $G = (X, \Gamma)$ (рис. 2).

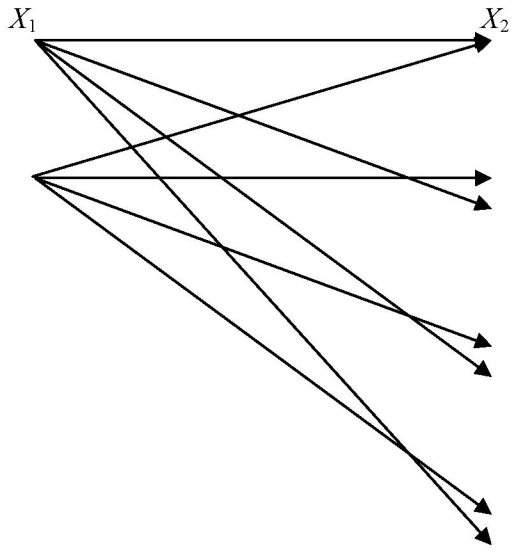


Рис. 2. Квазиупорядоченный граф состояний нижнего водоупора и технологических скважин в блоке.

На графе G всего 8 путей от x_1 до x_2 все они допустимые.

Неблагоприятным сочетанием является путь: $\mu = [x_{1.2}; x_{2.2}]$, если (6) не предусмотрены меры по улавливанию растворов. В этом случае при остановке насосов в течение τ суток ВР и ПР опустятся на величину:

$$H = V_z \cdot \tau, \text{ м} \quad (7)$$

или с учетом (4) получается:

$$H = \frac{\Delta\gamma \cdot \tau \cdot \theta \cdot K_{фг}}{K_п}. \quad (8)$$

Пример: дано $\Delta\gamma = 0{,}03$; $K_п = 0{,}28$; $\theta = 0{,}2$; $K_{фг} = 10$ м/сут; $\tau = 2$ сут.; $S_{бл} = 85 \cdot 10^3$ м^2

$$H = \frac{0{,}03 \cdot 2 \cdot 0{,}2 \cdot 10}{0{,}28} \cong 0{,}5 \text{ м.}$$

Следовательно, за двое суток растворы опустятся на 0,5 м, тогда при этом объем этих растворов составит:

$$V_о = 0{,}5 \cdot 85 \cdot 10^3 = 42 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

При среднем содержании металла в ПР 500 мг/л будет в этой ситуации потеряно:

$$M_п = \frac{85 \cdot 10^6 \cdot 0{,}5}{10^6} = 42 \text{ кг.}$$

Рассмотрим самую худшую ситуацию путь $\mu = [x_{1.2}; x_{2.1}]$ и при этом не предусмотрено каких-либо мер по улавливанию тонущих растворов за счет управления радиусом ячейки – $R_о$ и высотой фильтровых колонн в ячейках [1, 2].

В этом случае опускание растворов происходит не только под действием сил гравитации, но и от сложного поля динамических напоров в ячейках. Приближенно можно поле динамических напоров на пластовые воды с растворами считать постоянным и равным:

$$P(R) = \frac{S_н - S_о}{2}, \text{ м вод. ст.,} \quad (9)$$

где $S_н$ – компрессия на ЗС и $S_о$ – депрессия на ОС, м вод. ст..

В каждой ячейке блока, очевидно, растворы будут тонуть под действием двух сил и тогда скорость опускания растворов составит:

$$V_z = V'_z + \frac{\Delta\gamma \cdot \theta \cdot K_{фг}}{K_п}, \quad (10)$$

где

$$V'_z = \frac{1{,}157 \cdot \overline{K}_ф (S_н - S_о) \cdot \ell n\left(\ell n \frac{R_о}{R_с}\right)}{10^2 \cdot \overline{K}_п \cdot R_о \cdot 2}, \text{ м/сут.,} \quad (11)$$

V'_z – скорость опускания растворов под действием динамического напора $\frac{(S_н - S_о)}{2}$, м/сут.

Для рассмотренного выше примера будем иметь при $K_{фг} = \overline{K}_ф$ и $S_н = 70$ м вод. ст., а $S_о = 10$ м вод. ст., $R_о = 50$ м, $R_с = 0{,}08$ м:

$$V_z = \frac{1{,}157 \cdot 10 \cdot (70 - 10) \cdot \ell n\left(\ell n \frac{50}{0{,}08}\right)}{10^2 \cdot 0{,}28 \cdot 50 \cdot 2} + \frac{0{,}03 \cdot 0{,}2 \cdot 10}{0{,}28} = 0{,}46 + 0{,}21 = 0{,}67 \text{ м/сут.}$$

За время τ, сут. раствор опустится на H глубину, табл. 1.

Таблица 1. **Зависимость глубины H опускания ВР и ПР от времени**

τ, сут.	1	2	5	10	20	50
H, м	0,7	1,4	3,3	6,7	13,4	33,5

Из табл. 1 следует, что за 50 суток отработки блока без водоупора будет уже безвозвратно потеряны металл и реагенты в большом количестве:

- объем потерянных растворов

$$V_{\text{р}} = 85 \cdot 10^3 \cdot 33{,}5 \cdot 0{,}28 = 797 \cdot 10^3 \ \text{м}^3$$

при $\eta = 0{,}9$; $M_{\text{э}} = 8$ м; $\gamma_{\text{р}} = 1{,}7$ и расходе реагентов 15 г/л имеем потери ΔR:

$$\Delta R = \frac{797 \cdot 10^6 \cdot 15}{10^6} = 797 \ \text{т}$$

и металла при $M_{\text{э}} = 8$ м и $C = 0{,}05\%$

$$\Delta m = 85 \cdot 10^3 \cdot 1{,}7 \cdot M_{\text{э}} \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}05 \cdot 8 = 65 \ \text{т/месяц.}$$

В среднем, например, при добыче урана стоимости 1 т кислоты $C_{\text{к}} = 56$ \$/т и окиси-закиси урана 1 т = 26,0 \$/кг.

В этом случае при надлежащей технологии без потерь урана и кислоты только по одному блоку экономия составит:

$$Э = 56 \cdot 10^3 \cdot 26{,}0 + 797 \cdot 56 = 14560 \cdot 10^3 + 44700 + 1456 \cdot 10^3 \ \text{\$ США,}$$

т.е. почти полтора миллиона \$ или $219 \cdot 10^6$ тенге.

ЛИТЕРАТУРА

1. Язиков В.Г., Рогов Е.И., Забазнов В.Л., Рогов А.Е. Геотехнология металлов. Алматы. FORTRESS, 2005, 393 с.
2. Рогов А.Е., Рыспанов Н.Б. Математические основы геотехнологий. Алматы, FORTRESS, 2007, 367 с.
3. Справочник по геотехнологии урана: М. Энергоатомиздат, 1997, 672 с.

Рогов А.Е.

ГРАВИТАЦИЯ КҮШІ ӘСЕРІМЕН ЕРІТІНДІЛЕРДІ СҮЗГІДЕН ӨТКІЗУ ТЕОРИЯСЫНА

Rogov A.E.

TO THE THEORY OF A FILTRATION OF SOLUTIONS UNDER THE INFLUENCE OF GRAVITATION FORCES BIOLOGY