

УДК 622.775

А. Е. РОГОВ, В. А. ПАЗУМОВ

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ ФИЛЬТРОВОЙ КОЛОННЫ ДЛЯ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ПОДЗЕМНОМ СКВАЖИННОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ МЕТАЛЛОВ

(Представлена академиком НАН РК Е. И. Роговым)

Изучены критические параметры плоскорадиальной фильтрации при подземном скважинном выщелачивании урана. Получены аналитические формулы, позволяющие определить глубину залегания пласта или критическую длину фильтра, при которых фильтрация прекращается. Исследована зависимость этой критической глубины от размеров элементарных составляющих фильтрующей горной породы (минеральных зерен для пористой среды).

При подземном скважинном выщелачивании металлов замечено, что в каждом конкретном случае рабочая длина фильтровых колонн различная. Она может изменяться примерно от 4 до 12 м. Практически установлено также, что с глубиной плоскорадиального потока растворов в пористой среде продуктивного горизонта скорость его уменьшается от некоторой максимальной величины до нуля.

Интуитивно ясно, что это явление связано с потерей напора по высоте фильтровой колонны вследствие трения растворов о стенки порового пространства пласта. Однако до сих пор нет достаточно надежных теоретических работ по объяснению закономерности этого процесса. В работе [1] такая попытка сделана на базе аналитико-статистических представлений о ламинарных параллельных потоках фильтрации. В предлагаемой статье авторы обосновывают чисто теоретический подход к решению этой интересной задачи.

Теория вопроса. В основе технологии подземного скважинного выщелачивания урана лежит фильтрация выщелачивающего раствора через продуктивный пласт пористой горной породы от закачных скважин к откачной.

Рассмотрим гексагональную ячейку, которая состоит из одной откачной скважины радиусом R_0 и шести закачных скважин, расположенных в вершинах шестигранника, вписанного в окружность R .

Процесс фильтрации в окрестности откачной

скважины описывается законом Дарси, в соответствии с которым скорость фильтрации равна

$$V_{cp} = \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dr}, \quad (1)$$

где k – проницаемость пород, m^2 ; m – вязкость раствора, ПаЧс; $\frac{dP}{dr}$ – градиент давления по радиусу ячейки.

Переходя от скорости V_{ϕ} к расходу Q жидкости, получаем

$$Q = \frac{2\pi \cdot h \cdot k \cdot R}{\mu} \frac{dP}{dr}, \quad (2)$$

где h – мощность пласта, м.

Известно решение уравнения (2) в виде формулы Дюпюи:

$$Q = \frac{2\pi \cdot h \cdot k \cdot \Delta P}{\mu \cdot \lambda m R / R_c}, \quad (3)$$

где ΔP – давление раствора, подаваемого в закачную скважину, Па.

Такое движение раствора называется плоскорадиальным [2].

Логично предположить, что с увеличением глубины залегания полости и мощности пласта условия для фильтрации раствора ухудшаются, под действием гидростатического давления происходит схлопывание отдельных пор и скорость фильтрации уменьшается. Следовательно, должна существовать такая критическая глубина фильтровой колонны, при которой фильтрация падает до нуля. Из этого следует, что фильтро-

вая колонна в скважине имеет критическую длину, пропорциональную мощности пласта.

С целью оценки величины этой критической глубины или длины фильтровой колонны рассмотрим более простую задачу, решение которой объясняет возникновение сил внутреннего трения или вязкости при движении жидкости [3].

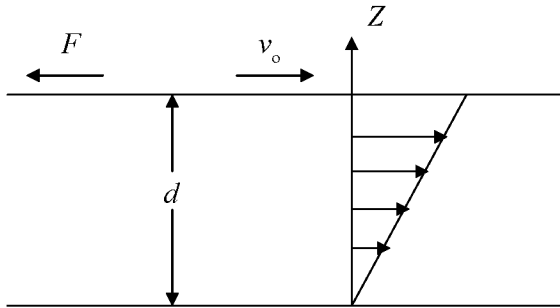


Рис. 1

Представим плоский слой жидкости, заключенный между двумя пластинами (рис. 1).

Верхняя пластинка движется с постоянной скоростью v_0 , а нижняя покоится. При этом на каждую пластинку со стороны жидкости действует сила F , которую можно измерить. Для данной жидкости сила F оказывается прямо пропорциональной скорости движения верхней пластинки и обратно пропорциональной расстоянию между пластинками. Кроме того, эта сила зависит от свойств жидкости, а именно от ее вязкости. Силу F можно записать следующим образом:

$$F = \mu \frac{S \cdot v_0}{d}, \quad (4)$$

где S – площадь пластины; d – расстояние между пластинами; μ – коэффициент вязкости данной жидкости.

Рассмотрим распределение скоростей в слое жидкости между пластинками. Верхний слой прилипает к верхней пластинке, и движется со скоростью v_0 . Нижний слой прилипает к нижней пластинке и его скорость равна нулю. В промежуточных слоях скорость непрерывно изменяется, т.е. представляет собой некоторую функцию от z . Производная этой функции по z называется градиентом скорости. Так как все промежуточные слои находятся в одинаковых условиях, градиент скорости есть величина постоянная:

$$\frac{\partial v_0}{\partial z} = \frac{v_0}{d}. \quad (5)$$

Заменяя $\frac{v_0}{d}$ его значениями из (5), получаем, что сила вязкости

$$F = \mu S \frac{\partial v}{\partial z}. \quad (6)$$

Аппроксимируя этот пример на наш случай фильтрации в пористой среде, можно в качестве верхней пластинки площадью S рассматривать всю поверхность зерен гранулометрического состава продуктивного пласта в области влияния скважин $S_{тр}^o$. Тогда сила вязкости, препятствующая фильтрации жидкости через продуктивный пласт, будет равна

$$F = \mu S_{тр}^o \frac{\partial v}{\partial H}, \quad (7)$$

где H – глубина залегания пласта (длина фильтра).

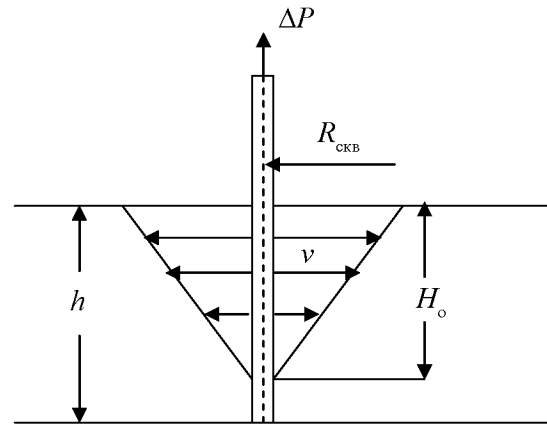


Рис. 2

Исходя из условия стационарности потока сила F должна уравниваться силой давления ΔP , действующей на поверхности закачной скважины (рис. 2).

$$\mu S_{тр}^o \frac{\partial v}{\partial H} + 2\pi R_{скв} h \Delta P = 0, \quad (8)$$

откуда

$$\frac{\partial v}{\partial H} = -\frac{\mu S_{тр}^o \partial v}{2\pi R_{скв} h \Delta P}.$$

Интегрируя, получаем

$$H_0 = -\int_{v_\phi}^0 \frac{\mu S_{тр}^o}{2\pi R_{скв} h \Delta P} \partial v = -\frac{\mu S_{тр}^o \cdot v}{2\pi R_{скв} h \Delta P} \Big|_{v_\phi}^0 = \frac{\mu S_{тр}^o \cdot V_\phi}{2\pi R_{скв} h \Delta P}, \quad (9)$$

где V_ϕ – максимальная скорость фильтрации выщелачивающего раствора на поверхности фильтровой колонны сверху.

Таким образом, формула (9) позволяет опре-

делить ту критическую глубину H_0 , по которой скорость фильтрации приближается к нулю. Распределение скорости фильтрации v с глубиной H показано на рис. 2.

При фиксированных значениях $m, V_\phi, R_{\text{скв}}, h$ и DP величина H_0 зависит от общей поверхности минеральных зерен фильтрующей породы породы в области влияния скважин $S_{\text{гр}}^0$.

Очевидно, что

$$S_{\text{гр}}^0 = N \cdot S_{\text{гр}}^1,$$

где N – количество зерен; $S_{\text{гр}}^1$ – площадь поверхности одного зерна; $S_{\text{гр}}^1 = 4\pi \cdot R_{\text{гр}}^2$ для зерна в форме шара.

Рассматривая область влияния скважин в виде цилиндра радиусом R и высотой h , находим, что при условии абсолютно плотной упаковки зерен

$$N = \frac{V_{\text{гр}}^0}{V_{\text{гр}}^1}, \quad (11)$$

где $V_{\text{гр}}^0 = \pi \cdot R^2 \cdot h$ – объем зоны влияния скважины; $V_{\text{гр}}^1 = \frac{4}{3}\pi \cdot R_{\text{гр}}^3$ – объем одного зерна.

На основе формул (9)–(11) была исследована зависимость H_0 от радиуса зерна $R_{\text{гр}}$ для месторождения Мынкудук. При этом $h = 8$ м, $m = 1410^{-3}$ ПаЧс, $R_{\text{скв}} = 0,08$ м, $V_\phi = 1,33$ м/с, $DP = 6410^5$ Па. При радиусе гексагональной ячейки 50 м величина R с учетом длины линий тока составляла 80 м. Была получена следующая кривая (рис. 3).

Анализ этой кривой показывает, что величина H_0 резко увеличивается с уменьшением радиуса зерна, оставаясь при этом меньше мощности пласта, что позволяет выбирать оптимальную длину фильтра исходя из опытных значений размеров минеральных зерен пород продуктивного пласта.

В решении задач, поставленных в предлагаемой статье, получены предварительные результаты. Необходимо продолжить исследования, в

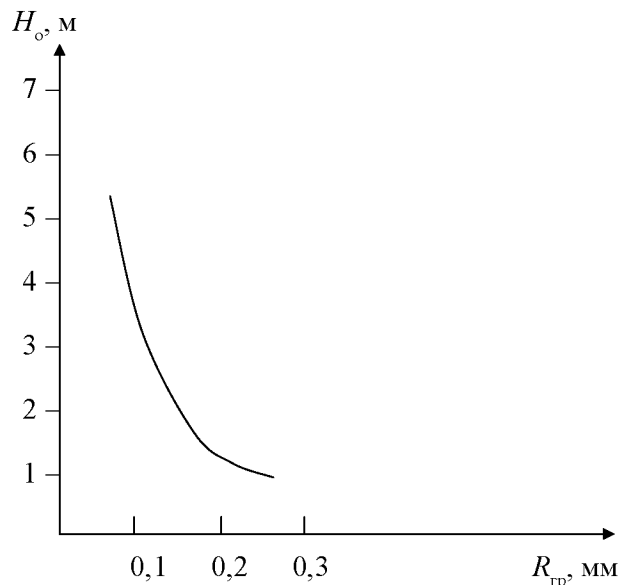


Рис. 3

частности, изучить расходные характеристики фильтрации в критическом режиме, зависимость H_0 от давления выщелачивающего раствора и максимальной скорости фильтрации V_ϕ , геометрических параметров ячейки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рогов Е.И., Кених М.В.* О потере напора по длине фильтровой колонны в закачных скважинах // Научно-техническое обеспечение горного производства: Сб. трудов ИГД им. Д. А. Кунаева. 2003. Т. 65. С. 122-129.
2. *Языков В.Г., Забазнов В.Л., Петров Н.Н., Рогов Е.И., Рогов А.Е.* Геотехнология урана на месторождениях Казахстана. Алматы, 2001. С. 179-181.
3. *Хайкин С.Э.* Физические основы механики. М.: Наука, 1971. С. 535-537.

Резюме

Мақалада уранды ұңғымалық жерасты ерітінділеу барысындағы жазықтарамды сүзілудің сыни параметрлері зерделенген. Сүзілудің тоқталынатынына қарай қат жатысының тереңдігін немесе сүзгінің сыни ұзындығын анықтау мүмкіндігін беретін аналитикалық формулалар алынды. Бұл сыни тереңдік сүзілдіретін тау жынысының элементарлы құрандыларының (кеуекті ортаның минералды микротүйіршіктері) мөлшерлерінен тәуелділігі тексерілді.

Summary

The article studies the critical parameters of the flat-radial filtration during underground uranium leaching. The analytical formulas as which filtration is ceased are received. The relationship between this critical depth and sizes of compounds of the filter rock (mineral grains for porous medium) is studied.

Поступила 3.05.05г.