

УДК 541.1.541.15

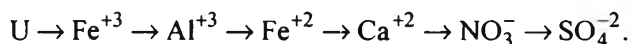
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ, ПОДВЕРГШИХСЯ ТЕХНОГЕННУМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Разыков З.А., Коптелов В.П., Юнусов М.М., Коптелов А.В.

(ГП «Востокредмет», Республика Таджикистан),

Авдонин Г.И., Ромашкевич Р.И., Кашин А.А. (ГУП ВНИИХТ)

При добыче урана подземным сернокислотным выщелачиванием на стадии закисления применяют растворы концентрацией 25—30 г/л, на стадии отработки — 10—15 г/л. По окончании процесса добычи технологические растворы, оставшиеся в недрах, продолжают мигрировать в водоносных горизонтах в направлении гидравлического уклона естественного потока подземных вод и могут являться источником загрязнения водозаборов в области разгрузки (реки, озера и др.). Зональность распространения основных макрокомпонентов имеет следующий вид:



Остальные компоненты, в том числе радионуклиды распространены в пределах сульфатного ореола [1].

Способы рекультивации подземных вод могут быть разделены на две основные группы: первая объединяет методы непосредственной очистки, вторая предусматривает использование механизма самоочищения. Выбор способа зависит от состояния объекта на время окончания отработки (степень извлечения урана 83,6%) и контролируется по данным химического анализа растворов в наблюдательных и контрольных скважинах, разбуренных по определенной сети. Вследствие фильтрационной неоднородности пород продуктивных горизонтов, разной интенсивности физико-химических процессов, а также неравномерности работы технологических скважин в пределах больших полигонов подземного сернокислотного выщелачивания создание требуемой сети наблюдательных и контрольных скважин сопряжено с увеличением стоимости добычи.

Цель настоящей работы — обоснование возможности применения математического моделирования для определения механизма физико-химических процессов, происходящих в водоносном горизонте после окончания выщелачивания, при сопоставлении расчетных данных с результатами опыта.

В качестве объекта для проведения опытных работ в режиме «пакетной» протяжки использован блок месторождения СК, оборудованный двумя закачными, одной откачной и тремя наблюдательными скважинами (рис. 1).

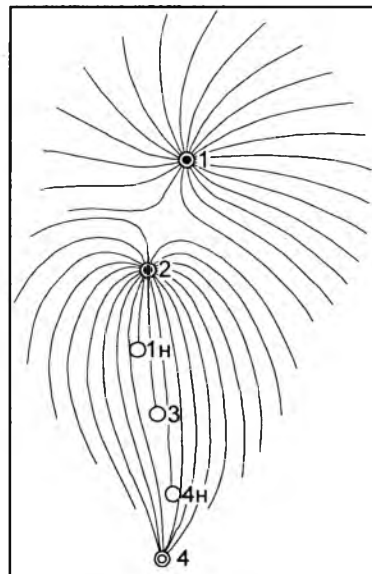
Характеристики блока:

Мощность водоносного горизонта, м . . .	30
Коэффициент фильтрации вмещающих пород, м/сут . . .	6,5
Активная пористость пород . . .	0,25
Коэффициент анизотропии пласта . . .	0,3
Длина фильтров скважин, м . . .	28—29
Фоновая концентрация SO_4^{-2} в пластовых водах, г/л . . .	0,35

Средняя производительность откачной скважины № 4 за время проведения опыта составила 6 м³/ч, закачных № 1, 2 — 3 м³/ч. Концентрация SO_4^{-2} в пакете —

13,2 г/л. Время закачки — 60 сут. Пробы из наблюдательных скважин № 1н, 3 и 4н отбирали ежесуточно до прохождения максимальной концентрации по SO_4^{-2} , затем через каждые 3 сут. Объем каждой пробы 6 м³. Фактическое изменение концентрации иона SO_4^{-2} в растворах наблюдательных скважин приведено в табл. 1.

На основании опыта можно сделать вывод, что рекультивация в пакетном режиме лимитируется как обменными процессами (сорбция SO_4^{-2} на породе), так и разбавлением пластовыми водами по мере вытекания техногенных растворов на периферию. По-видимому, при естественной деминерализации после отработки блоков линзы остаточных растворов перемещаются с потоком подземных вод. Эффективность способа зависит от кислотности, сорбционно-емкостных свойств пород и скорости потока подземных вод.



Р и с. 1. Схема проведения опыта: ⊙, ⊙, ○ — откачная, закачная и наблюдательные скважины соответственно; J — линия тока раствора

Таблица 1. Концентрация SO_4^{-2} в процессе опыта, г/л

Время от начала протяжки, сут	Скважина		
	1н	3	4н
30	0,5	0,35	0,35
60	0,52	0,35	0,35
90	1,2	0,35	0,35
105	2,6	0,35	0,35
120	2,1	0,35	0,35
135	1,8	0,7	0,35
150	1,7	0,88	0,5
160	1,6	1,3	0,5
165	1,3	1,2	0,5
195	1,05	1,2	0,66
210	1,05	1,0	0,7
235	1,05	1,0	0,6
250	1,0	0,5	0,5

Методы определения количественных характеристик загрязняющего влияния подземного сернокислотного выщелачивания на продуктивный горизонт требуют значительных трудозатрат, связанных с лабораторными исследованиями сорбционно-емкостных свойств пород и бурением значительного количества наблюдательных скважин. В связи с этим возникает необходимость математического описания механизма происходящих процессов (создания модели) и разработки соответствующего программного обеспечения.

На исследуемом объекте процесс миграции i -го компонента рассчитан на примере SO_4^{-2} .

Для прогнозирования состояния водоносного горизонта на любой заданный момент времени T от начала ведения процесса рекультивации на основе модели фильтрации техногенных растворов [1] определяли геотехнологические параметры по трубкам тока, число которых N может быть задано в соответствии с требуемой точностью расчета:

$L_j = \sum_{l=1}^n L_l$ — длина j -й трубки тока при числе координатных точек суммирования n длины элементарных отрезков L_l ;

T_{Lj} — время поршневого вытеснения по j -й трубке тока;

Q_L — расход потока в трубке;

$V_{ij} = (T - T_{Lj})Q_L$ — объем технологических растворов, прошедших через сечение трубки тока в наблюдательной скважине на момент времени T ;

$V_{Lj} = T_{Lj}Q_L$ — объем порового пространства j -й трубки тока;

$V_j = V_{Lj} / K_n$ — полный объем j -й трубки тока при пористости рудовмещающих пород K_n ;

$M_j = V_j p$ — горнорудная масса по j -й трубке тока при объемной массе пород p ;

$U_j = L_j / T_{Lj}$ — скорость движения растворов по j -й трубке тока.

Если для трубки тока как макроскопической системы ввести допущения, что обменные процессы в ней протекают независимо и система электронейтральна (т.е. происходит эквивалентный обмен ионов между породой и раствором), то в общем случае массоперенос i -го компонента описывается уравнением вида

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = K_n S \frac{\partial C_i}{\partial V_{Tj}} + S \frac{\partial m_i}{\partial V_{Tj}}, \quad (1)$$

где C_i — концентрация i -го компонента; S — площадь поперечного сечения трубки тока; m_i — поглощающая способность породы по i -му компоненту; x — пространственная координата анализируемой точки в трубке тока.

При использовании уравнений, описывающих обратимую кинетику второго порядка, а также кинетику, приводящую к уравнению типа изотермы Лэнгмюра, уравнение (1) имеет аналитическое решение, программно реализованное в модели миграции i -го компонента [2]:

$$V = \left(K_n + \frac{m_i}{C_{0i}} \right) V_{Lj} + \frac{U_j S}{B_i (K_i - 1)} \ln \frac{C_i / C_{0i}}{[1 - (C_i / C_{0i})]^{K_i}},$$

где K_i — константа скорости реакции i -го компонента; C_{0i} — фоновая концентрация i -го компонента; B_i — коэффициент, прямо пропорциональный коэффициенту диффузии и обратно пропорциональный площади поверхности частицы породы и ширине диффузионного слоя.

Адаптация модели заключается в определении оптимальных параметров m_i , B_i , K_i по минимуму среднеквадратичного отклонения теоретических и фактических кривых концентрации i -го компонента в растворах наблюдательных скважин. При этом должны выполняться следующие условия: если $T < T_L$, то концентрация i -го компонента на конце трубки тока равна ее фоновому значению, если $T \geq T_L$, то рассчитываются $C_{ij}(T)$.

Концентрация i -го компонента в наблюдательной скважине рассчитывается по формуле

$$C_{ik} = \sum_{j=1}^k \frac{C_{ij}(T)}{N},$$

где k — число трубок тока, «пришедших» на момент времени T от соответствующей закачной скважины.

Программная реализация определения оптимальных характеристик m_i , B_i , K_i по минимуму среднеквадратичного отклонения фактической и расчетной концентрации SO_4^{-2} приведена в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Расчетные параметры изотермы Лэнгмюра

Номер скважины	Оптимальные характеристики			Среднеквадратичное отклонение
	K_{SO_4}	B_{SO_4}	m_{SO_4}	
1н	9,8	0,007	15,4	0,04
3	9,4	0,095	14,4	0,06
4н	9,2	0,027	14,6	0,03

Анализ табл. 2 показывает, что время появления максимальной концентрации лимитируется макродисперсией, т.е. различным временем поршневого вытеснения по трубкам тока, в то время как их частные значения являются также функцией кинетических факторов.

Следует отметить, что на модели по всем наблюдательным скважинам происходит более резкое снижение концентрации SO_4^{-2} после прохождения максимального значения по сравнению с фактической. Это однозначно определяет неполное соответствие математического описания механизму пакетного режима подачи технологических растворов и последующей деминерализации. По-видимому, при последующей закачке пластовых вод происходит сдвиг равновесия порода—раствор в сторону перехода ранее сорбированного (осажденного) SO_4^{-2} в жидкую фазу, что в описанной модели не учтено.

Описание перехода осажденного SO_4^{-2} из твердой в жидкую фазу по трубке тока программно реализуется по следующему алгоритму.

1. Рассчитывается общее количество i -го компонента, мигрирующего по трубке тока:

$$M_i^{\text{общ}} = Q_L T_3 C_{0i},$$

где T_3 — время закачки пакета растворов.

2. Рассчитывается количество i -го компонента, выведенного из системы (трубки тока) в жидкой фазе за период прохождения пакета растворов через точку с координатами наблюдательной или откачной скважины:

$$M_i^{ж.ф} = \frac{1}{2} (C_{0i} + C_i(T_{Lj} + T_3)) T_3 Q_L,$$

где $C_i(T_{Lj} + T_3)$ — максимальная концентрация i -го компонента на момент времени $T = T_{Lj} + T_3$.

3. Рассчитывается количество осажженного (сорбированного) компонента:

$$M_i^c = M_i^{общ} - M_i^{ж.ф}.$$

4. При $(T - T_L) > T_3$ количество i -го сорбированного компонента, перешедшего в жидкую фазу на момент времени T , рассчитывается по формуле (изотерма десорбции):

$$\varepsilon_i(T) = M_i^c \exp[-K_{di}(T - T_L - T_3)],$$

где K_{di} — константа скорости перехода i -го компонента из твердой фазы в жидкую (константа десорбции);

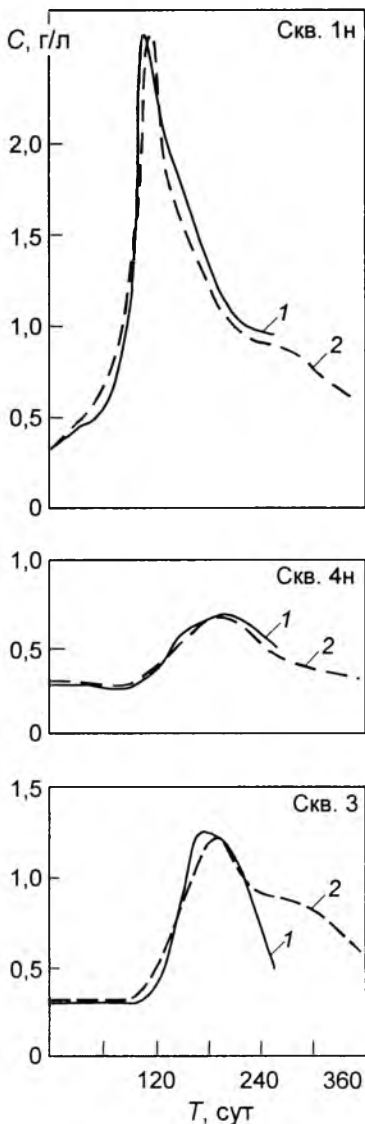
$$C_i(T) = \varepsilon_i(T) - \frac{\varepsilon_i(T + \Delta T)}{Q_L \Delta T}.$$

Таким образом, адаптация модели, описывающей механизм пакетной закачки раствора, заключается также в определении оптимального значения константы K_{di} по минимуму среднеквадратичного отклонения фактической концентрации $C_i = f(T)$ от расчетной (рис. 2).

В табл. 3 приводятся результаты адаптации модели по наблюдательным скважинам.

В свою очередь, характеристики процесса K_{SO_4} , B_{SO_4} , m_{SO_4} , K_{aSO_4} (см. табл. 2, 3) имеют тенденцию к изменению по мере фильтрации пакета, что, возможно, объясняется различным составом пород в зонах наблюдательных скважин.

Приведенное математическое описание процесса миграции i -го компонента технологических растворов в сочетании с моделями фильтрации и кинетики процесса перехода макрокомпонентов из твердой фазы (порода) в жидкую может быть использовано для разработки природоохранных



Р и с. 2. Сопоставление фактического (1) и расчетного (2) изменения концентрации SO_4^{-2} в наблюдательных скважинах

Т а б л и ц а 3. Расчетные константы десорбции

Номер скважины	Оптимальное значение K_{di}	Среднеквадратичное отклонение
1н	0,0022	0,01
3	0,0019	0,06
4н	0,0022	0,09

мероприятий и выбора метода рекультивации пластовых вод полигонов подземного выщелачивания, хвостохранилищ и на объектах захоронения жидких отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по геотехнологии урана. Под ред. Д.И. Скороварова. М.: Энергоатомиздат, 1997.
2. Самсонов Г.В., Тростянская Е.Б., Елькин Г.Э. Ионный обмен. Сорбция органических веществ. Л.: Наука, 1969.

Поступила в Редакцию 4.11.02

УДК 621.039.31

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПРОТИВОТОК В ЦЕНТРИФУГЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ТРАНЗИТНЫМ ПОТОКОМ

Токманцев В.И. (Уральский гос. технический ун-т)

Введение. Основное дифференциальное уравнение метода усреднения по радиусу [1—9], описывающее осевое изменение средней концентрации изотопной смеси в обогатительной ($0 \leq z \leq z_F$, $r_0 \leq r \leq a$) или обеднительной зоне ($z_F \leq z \leq H$, $r_0 \leq r \leq a$) стандартной трехполюсной центрифуги при малом радиальном конвективном потоке, имеет вид

$$g_i(c_i - \bar{c}) = L \left(2\varepsilon_S \bar{c}(1 - \bar{c}) - K \frac{d\bar{c}}{dz} \right), \quad (1)$$

где g_i , c_i — массовый поток и концентрация в отборе ($i = P$) или отвале ($i = W$); $\bar{c}$ — средняя массовая концентрация ценного изотопа; L — интенсивность противотока; ε_S — эффективный коэффициент радиального обогащения; K — высота единицы переноса в сечении z ; r_0 — эффективная внутренняя граница разделительной области [10]; a — радиус ротора; H — его высота.

В классической теории под $\bar{c}(z)$ в уравнении (1) принято понимать или концентрацию на боковой стенке [3], или чаще [1, 2, 4—8] концентрацию, полученную путем усреднения точной концентрации $c(r, z)$ по радиальной координате:

$$\bar{c}^{\text{кл}}(z) = \frac{\int_{r_0}^a c r dr}{\int_{r_0}^a r dr} = \frac{2}{a^2 - r_0^2} \int_{r_0}^a c r dr.$$