



УДК 622.234.42

Е.Ю. Михайловская

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСТВОРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНА НА ХОХЛОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

A mathematical model of flow is considered for development of uranium ore deposit by underground leaching. The flow is examined in approximation of 2-D areal model. Input data for the modeling are determined from an analysis of exploratory drilling at the ore deposit Khokhlovskoye. The flow equation is solved numerically by the method of successive overrelaxation. Operation mode parameters of the leaching process are determined according to planned rate of the reagent in the injection wells.

Рассмотрена математическая модель процессов фильтрации при разработке уранового месторождения методом подземного выщелачивания. Фильтрация рассматривается в приближении двумерной плановой модели. Исходные данные для моделирования определялись из анализа данных разведочного бурения на Хохловском месторождении. Уравнение фильтрации решалось численно методом последовательной верхней релаксации. Режимные параметры процесса выщелачивания определялись в соответствии с планируемыми расходами реагента в закачивающих скважинах.

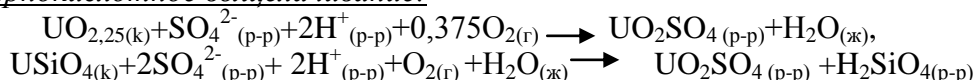
Одна из важнейших проблем, от решения которой зависит устойчивое развитие человечества, - обеспечение стабильно увеличивающегося производства энергии [1]. Только за период с 1860 по 1985 г. поток энергии, потребляемый мировой экономикой, возрос в 60 раз. Сегодня мировое потребление продолжает неравномерно, но неуклонно расти [2]. В связи с уменьшением запасов углеводородных энергоносителей для решения этой проблемы в концепциях развития энергетики многих стран мира предполагается увеличить долю выработки энергии на атомных электростанциях. Для этого необходимо развитие урановой сырьевой базы и разработку экономически эффективных и экологически безопасных технологий добычи сырья для ядерных энергетических реакторов. Перед российскими учёными и специалистами производственных организаций поставлена задача в ближайшие 10 лет значительно увеличить добычу урана. Принятая в 1997 г. Федеральная целевая программа «Уран России» ориентированна на поиски, ускоренную разведку и освоение новых месторождений урана, пригодных для разработки экологически безопасными методами подземного выщелачивания, это ещё раз подтверждает актуальность данной работы. [3].

Одна из наиболее перспективных в этом смысле технологий разработки пластовых урановых месторождений в осадочных толщах является метод подземного выщелачивания. Метод подземного выщелачивания является в настоящее время одним из самых эффективных и безопасных методов добычи урана на месторождениях, образовавшихся позднее вмещающих их горных пород. Этот метод позволяет достичь высоких уровней извлечения урана при сравнительно низких затратах, при его использовании не образуются провалы земной поверхности, отвалы забалансовых руд и пустых пород. Вместе с тем реализация метода при необоснованных технологических режимных параметрах (избыточная или недостаточная закачка реагента, нерациональное расположение нагнетательных и откачивающих скважин) может привести к уменьшению степени извлечения урана и уменьшению экономической эффективности добычи и появлению в разработанном пласте линз избыточных технологических растворов, приводящих к загрязнению окружающей среды.

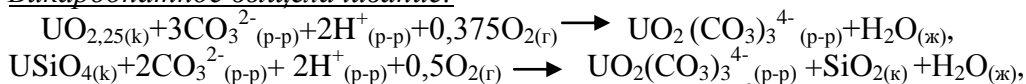


В промышленности в зависимости от минерального состава вмещающих пород и типа рудной минерализации используют два основных способа подземного выщелачивания урана: серноокислотный (широко применявшийся в СССР) и бикарбонатный, (распространённый в США), в качестве окислителя применяют кислород, пероксид водорода, трёхвалентное железо. Высокая эффективность способа привела к снижению требований промышленности к качеству уранового сырья (минимальное бортовое содержание может быть снижено с 0,01% до 0,005%, тогда как для месторождений, обрабатываемых горным способом ~ 0,03%). Геологические и гидрологические условия локализации полиэлементного оруденения на месторождениях такого типа преимущественно благоприятны для добычи полезных компонентов подземным выщелачиванием [3].

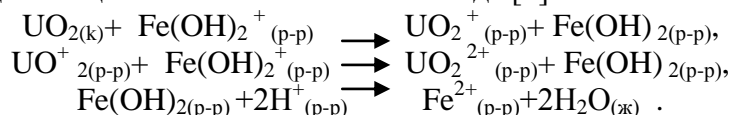
Серноокислотное выщелачивание:



Бикарбонатное выщелачивание:



В кислой среде окислителем может выступать  $\text{FeOH}^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . При этом реакция выщелачивания запишется в виде [3]:



Хохловское месторождение расположено на стыке Зауральского поднятия и Тюменско-Кустанайского прогиба в Южной части Среднего Зауралья. Всего здесь три месторождения урана – Далматовское, Хохловское и Добровольское, общие запасы которых оцениваются в 30 – 35 тыс. тонн урана. Рудное поле Хохловского месторождения имеет протяжённость 28 км и расположено в пределах самого южного притока Песчанской палеосистемы, имеющего простирание с юго-запада на северо-восток, прослеженного на 65 км. Глубина залегания продуктивной толщи составляет 520 – 680 м.

Главным урановым минералом является настуран. Настуран присутствует в виде глобул, иногда полых, с размерами 0,0n-0,n мкм, агрегатов и цепочек глобул размером до нескольких микрон, пленок, корочек с трещинами усыхания, почек размером от 0,n до 10-20 мкм. Богатые урановые руды, с содержанием урана свыше 0,1 %, локализованы в темно-серых песчаниках. Руды с содержанием урана от 0,01% до 0,1 % встречаются практически во всех литологических и геохимических разностях, в сероцветных и обеленных породах [4].

Метод подземного выщелачивания характеризуется такими параметрами как лёгкая вскрываемость пород и высокой степенью извлечения урана. Например, бикарбонатные (содержание  $\text{CO}_2$  ниже 1%) руды с исходными содержаниями урана 0,01-0,1% обладают лёгкой вскрываемостью растворами серной кислоты (5-30 г/л); степень извлечения урана из руд высокая (85-97%), удельные расходы реагента низкие (25-100 кг/кг урана или 5-15кг/т руды). Для слабокарбонатных руд (содержание  $\text{CO}_2$  ниже 1-2,5%) расходы реагента возрастают до 30 кг/т руды. Дополнительные характеристики такие как отсутствие отвалы забалансовых руд и пустых пород и провалов, увеличивают вероятность его применения при добычи урана. При таких параметрах важно точно рассчитать необходимое количество реагента, в противном случае может произойти загрязнение подземных вод остаточными серноокислотными растворами, содержащими экологически вредные вещества.

Существует два способа восстановления качества подземных вод: 1) самопроиз-



вольное, в результате нейтрализационных процессов, стремясь к исходному состоянию; 2) принудительное: а) извлечение остаточных растворов из недр и их отчистка от вредных веществ на поверхности; б) нейтрализация растворов в недрах. Способы отличаются по времени восстановления и применению к отдельным литологическим средам.

Наиболее обоснованным способом расчета течения реагента через породы пласта являются методы математического моделирования. Для этого была рассмотрена математическая модель фильтрации растворов в приближении двумерной плановой модели [5]. Компоненты скорости фильтрации  $v_x$  и  $v_y$  в декартовых координатах  $x, y$  удовлетворяют уравнению неразрывности

$$\frac{1}{h} \frac{\partial(v_x h)}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial(v_y h)}{\partial y} = \Omega(x, y)$$

и уравнениям Дарси

$$v_x = -f \frac{\partial H}{\partial x}, \quad v_y = -f \frac{\partial H}{\partial y},$$

где  $f$  – коэффициент фильтрации;  $H$  – величина напора в пласте;  $h$  – мощность пласта;  $\Omega$  – плотность источников и стоков.

В рассматриваемом случае имеют место только сосредоточенные источники и стоки, вследствие чего функция  $\Omega$  является сингулярной. Подставляя уравнения в уравнение неразрывности, получим уравнение фильтрации в виде

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( hf \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( hf \frac{\partial H}{\partial y} \right) = -\Omega.$$

Рассматривалась прямоугольная область:  $X_1 \leq x \leq X_2$ ,  $Y_1 \leq y \leq Y_2$ . Для решения уравнения фильтрации вводилась регулярная конечно-разностная сетка:  $x_i = X_1 + \Delta_x(i-1)$ ,  $y_j = Y_1 + \Delta_y(j-1)$ ;  $i = 1, \dots, N_x$ ;  $j = 1, \dots, N_y$ . Здесь  $\Delta_x, \Delta_y$  – расстояния между соседними узлами по координатам  $x$  и  $y$  соответственно.

Для решения уравнения фильтрации использовался модифицированный метод последовательной верхней релаксации [6]

$$H_{i,j}^{n+1} = H_{i,j}^n + \frac{\omega}{2(1+b^2)} \left\{ r_{i+\frac{1}{2},j} (H_{i+1,j}^n - H_{i,j}^n) - r_{i-\frac{1}{2},j} (H_{i,j}^n - H_{i-1,j}^{n+1}) + \right. \\ \left. + b^2 \left[ r_{i,j+\frac{1}{2}} (H_{i,j+1}^n - H_{i,j}^n) - r_{i,j-\frac{1}{2}} (H_{i,j}^n - H_{i,j-1}^{n+1}) \right] + \frac{b}{F_{\max}} \Delta_x \Delta_y h_{i,j} \Omega_{i,j} \right\},$$

где  $b = \Delta_x / \Delta_y$ ;  $H_{i,j}^n$  – значение  $H(x_i, y_j)$  на итерации  $n$ ;  $h_{i,j} = h(x_i, y_j)$ ,  $\Omega_{i,j} = \Omega(x_i, y_j)$   
 $r_{i,j} = (h_{i,j} f_{i,j}) / F_{\max}$ ,  $f_{i,j} = f(x_i, y_j)$ ,  $F_{\max} = \max_{x,y} \{h(x, y) f(x, y)\}$ .

Полагалось, что размеры области моделирования достаточно велики, так что возмущающее воздействие нагнетательных и откачивающих скважин на значения напоров на границах области можно не учитывать. Вследствие этого граничные условия для уравнения фильтрации записывались в виде

$$x = X_1, \quad H = H_1(y); \quad x = X_2, \quad H = H_2(y); \\ y = Y_1, \quad H = H_3(x); \quad y = Y_2, \quad H = H_4(x).$$

Значения функций  $H_1, H_2, H_3, H_4$  определялись для невозмущенного регионального течения подземных вод в пласте. Величины  $h(x, y)$  определялись геостатистическими методами на основании локальных значений  $h$ , полученных из анализа керна при разведочном бурении. Величина  $f$  определялись по результатам тестовых откачек в скважинах. Из



анализа полученных значений  $f$  следует, что в исследуемом пласте величину  $f$  приближенно можно считать постоянной. Плановое распределение  $h(x, y)$  приведено на рис. 1.

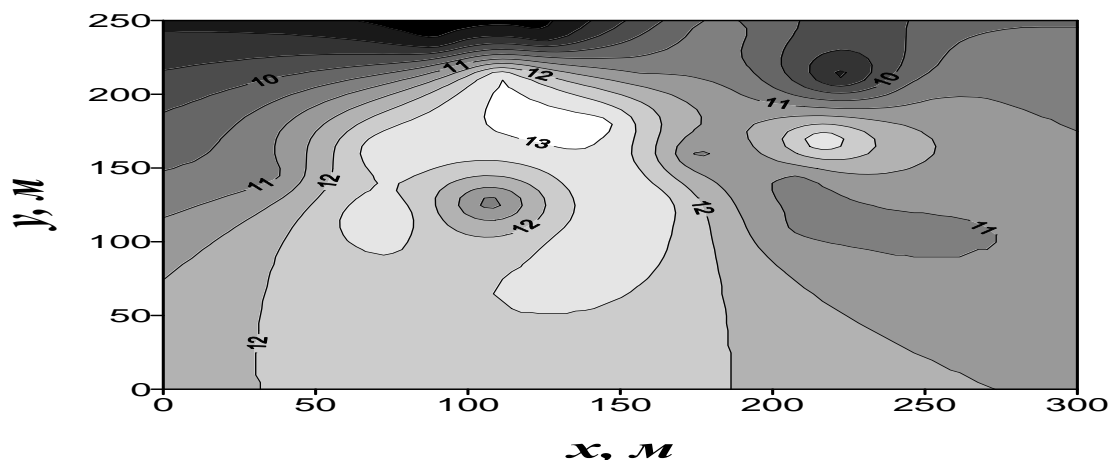


Рис. 1. Плановое распределение  $h(x, y)$  (пояснение в тексте)

Расчеты распределений напоров в пласте проводились для рекомендованных в [4] значений расходов реагента в закачивающих скважинах и интенсивности откачки в откачивающих скважинах.

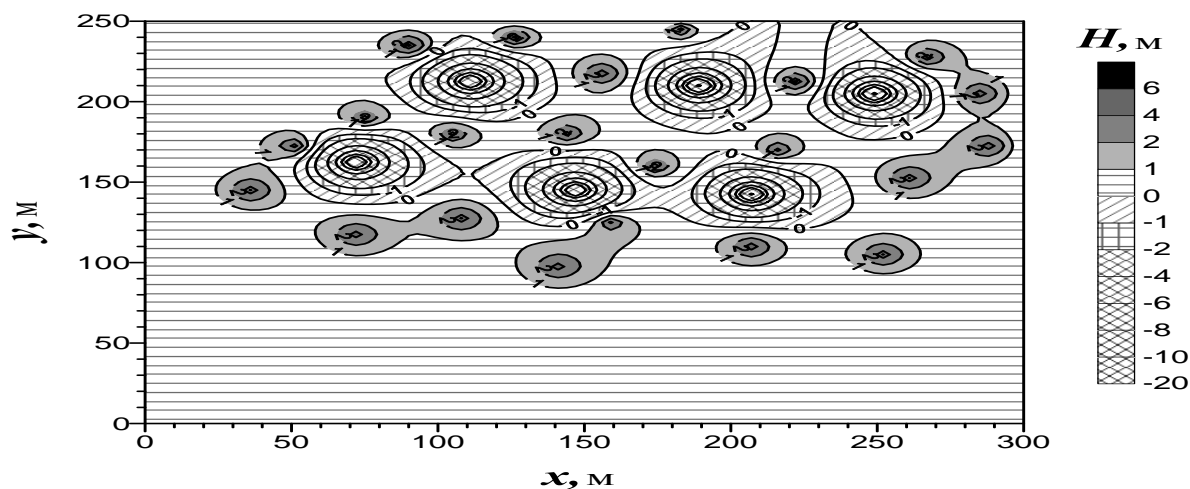


Рис. 2. Распределение напоров в пласте(пояснение в тексте)

Результаты расчетов свидетельствуют об относительно равномерном распределении скоростей по полярному углу относительно откачивающих скважин. Полученные распределения скоростей течения растворов будут в дальнейшем использованы для расчета эффективности разработки исследуемого участка месторождения методом подземного выщелачивания.

#### Список литературы

1. Тарасова, Н.П. Устойчивое развитие: ресурсы России /Н.П.Тарасова, Н.П.Лаверов, Е.Б.Кручина и др. – М.: Изд центр РХТУ. 2004. – 212 с.
2. Лавёров, Н.П. Подземное выщелачивание полиэлементных руд/ Лавёров Н.П., И.Г.Абдульманов, К.Г.Бровин.- М.: Издательство Академии горных наук, 1998. –446 с.
3. Медоуз, Д.Х. За пределами роста/ Д.Х.Медоуз, Д.Л.Медоуз, Й.Рандерс.-М.: Прогресс. -1994.-304с.



4. Марков, С.Н. Геологоразведочные работы по оценке промышленной значимости Хохловского месторождения урана/ С.Н.Марков, С.И.Долбилин.- с. Петропавловское.- 2003.- 173с. Государственный регистрационный №73-00-1/6
5. Мироненко, В.А. Динамика подземных вод / В.А.Мироненко.- М.: МГТУ, 1996.-519 с.
6. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика /П. Роуч. – М.: Мир, 1980. - 616с.

УДК 66.074.3

О.И. Козинская

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

## ОЧИСТКА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ОТ НЕОРГАНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

A technological scheme is worked out for purifying exhaust gases containing ashes, soot, mixture of polycyclic, aromatic, saturated and un saturated hydrocarbons,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  and other components.

Разработана технологическая схема для очистки отходящих газов, содержащих золу, сажу, смесь полициклических, ароматических, предельных и непредельных углеводородов, а также  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  и других компонентов.

Большую сложность вызывает очистка отходящих газов от смеси различных неорганических и органических компонентов, содержащих, например, золу, сажу, смесь полициклических, ароматических, предельных и непредельных углеводородов, а также оксидов азота и серы, хлористого водорода и других компонентов при температуре 400-600°C, поскольку нет единого метода очистки для их одновременного обезвреживания [1].

Очистка таких газов, как правило, происходит в несколько стадий (ступеней): пылеочистка, термическое окисление органических компонентов, адсорбционная очистка ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ).

*Пылеочистка.* Традиционно пылеочистка осуществляется в электрофильтрах и рукавных фильтрах. В некоторых случаях используются специальные рукавные фильтры из графитизированной ткани или металлокерамические фильтры при высокой температуре отходящих газов (600 – 1000°C), когда понизить температуру не представляется возможным. В приведенном примере (температура 400 – 600°C) за пылеочисткой должна следовать термокаталитическая очистка, для которой нужна температура 350 – 600°C, поэтому понижать температуру для пылеочистки не желательно и в данном случае будут использоваться специальные фильтры.

*Термокатализ.* Очистка от смеси полициклических, ароматических, предельных и непредельных углеводородов осуществляется термическими, термокаталитическими и адсорбционными методами. Наиболее подходящим методом для этого случая является термокатализ. Этот метод обезвреживания органических компонентов отходящих газов имеет значительные преимущества над другими методами (адсорбцией, термическим дожиганием). При термическом дожигании температура достигает 1000 – 1300°C и выше. В отличие от термического дожигания данный способ обеспечивает высокую степень очистки (свыше 99%) при более низких температурах (350 – 600°C), а следовательно, требует меньших затрат энергии, да и с конструкционными материалами проще. Каталитические методы дают возможность обезвреживать органические соединения различного содержания и концентрации. В связи с ростом стоимости энергоресур-