

ИССЛЕДОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ СПОСОБОВ ОГРАНИЧЕНИЯ РАСТЕКАНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

АЛИКУЛОВ Ш. Ш., СОБИРОВ Ж., ХАЙДАРОВА М. Э.

В статье представлены результаты моделирования на основе программы 3D MAX. Моделируемый опытно-промышленный участок расположен на блоке месторождения. На участке расположены девять технологических скважин (шесть закачных и три откачных) с вертикальными протяженными коллекторами. Моделируемый участок приурочен к центральной части продуктивного горизонта, подошва которого залегает на глубине 95–97 м, верхний и нижний водоупоры выдержаны, литологические окна отсутствуют. В процессе моделирования изучалась структура подземного потока растворов, формирующихся при включении в работу протяженных коллекторов разной длины и проницаемости. Полученная в результате решения начального варианта гидродинамическая картина потока в пределах опытно-промышленного участка показала симметричное распространение растворов по единичным гидродинамическим ячейкам поля.

Ключевые слова: коллектор; выщелачивание урана; моделирование; коэффициент фильтрации; глубина залегания рудного тела; продуктивный горизонт.

В статье представлены результаты анализа применения вертикальных протяженных коллекторов. Оценка влияния протяженности (длины) и степени проницаемости коллекторов на основные геотехнологические показатели отработки для условий месторождения выполнена экспериментальным путем с использованием моделирования. Промоделировано семь основных вариантов задачи, взаимосвязывающих длину и проницаемость коллектора (таблица).

Коэффициент фильтрации заполнителя протяженного коллектора (гранулированного полиэтилена) определен на приборе КФ-ООМ в химико-грунтоведческой лаборатории предприятия. По результатам моделирования построены гидродинамические сети потоков, формирующихся под влиянием протяженных коллекторов, выполнены расчеты времени закисления и времени отработки единичной гидродинамической ячейки, а также расхода реагента и средней концентрации полезного компонента в продуктивных растворах.

Моделирование выполнено с использованием программы 3D MAX. Моделируемый опытно-промышленный участок расположен на блоке месторождения. В состав участка входят девять технологических скважин (шесть закачных и три откачных) с вертикальными протяженными коллекторами. Моделируемый участок приурочен к центральной части продуктивного горизонта, подошва которого

Аликулов Шухрат Шарофович – кандидат технических наук, доцент кафедры техники и технологии добычи руд редких и радиоактивных металлов. 210100, Республика Узбекистан, г. Навои, ул. Южная, 27а, Навоийский государственный горный институт. E-mail: sharofovich@mail.ru

Собиров Жасур – магистрант кафедры техники и технологии добычи руд редких и радиоактивных металлов. 210100, Республика Узбекистан, г. Навои, ул. Южная, 27а, Навоийский государственный горный институт. E-mail: jasur@mail.ru

Хайдарова Малохат Эркиновна – магистрант кафедры техники и технологии добычи руд редких и радиоактивных металлов. 210100, Республика Узбекистан, г. Навои, ул. Южная, 27а, Навоийский государственный горный институт. E-mail: maloxat@mail.ru

залегает на глубине 95–97 м, верхний и нижний водоупоры выдержаны, литологические окна отсутствуют. Воды горизонта напорные, глубина залегания пьезометрического уровня от 48–57 м (на севере) до самоизлива (на юге), напор над кровлей увеличивается в том же направлении от 35–50 до 130–140 м. Водовмещающими породами являются песчано-глинистые отложения с коэффициентом фильтрации 4–12 м/сут. Мощность горизонта, изменяющаяся от 6,5–7,5 м на левом фланге участка до 4,5 м на правом, идентична для каждой группы из трех скважин, образующих элементарные гидродинамические ячейки. Водообильность пород, по данным опытных работ, изменяется от 1,2 до 5,6 л/с при понижении уровня 1,63–8,34 м. Удельные дебиты скважин составляют 0,26–1,28 л/с. Дебиты при самоизливе изменяются от 1,8 л/с на границе самоизлива до 50–72 л/с в юго-восточной части горизонта [1–4].

**Основные варианты моделирования систем ПВ
с вертикальными коллекторами**

| Проницаемость, м/сут | Длина протяженного коллектора, м (%) | | |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------|------------|
| | 5,2 (20) | 11,6 (46) | 25,0 (100) |
| 144 | I | II | III |
| 280 | IV | V | VI |

Начальный вариант – без протяженных коллекторов.

При схематизации природной обстановки для моделирования приняты следующие осредненные значения параметров: размеры единичной гидродинамической ячейки – 25 × 45 м; мощность продуктивного горизонта – 6 м; коэффициент фильтрации – 8 м/сут; расходы технологических скважин в зависимости от их местоположения в пласте – 25, 50 и 100 м³/сут. Рассчитанные фильтрационные сопротивления переводились с помощью масштабных коэффициентов в электрические, которые набирались на сетках электроинтегратора, соединенных в плановую модель. Изменение проницаемости при задании протяженных коллекторов учитывалось пересчетом и заменой соответствующих сопротивлений в зоне действия коллектора. Съемы электрических потенциалов: в начальном варианте без протяженных коллекторов – во всех узлах модели для оценки возможного влияния граничных условий применительно к единичной гидродинамической ячейке, в остальных вариантах – только для расчетной единичной ячейки.

Полученные потенциалы использовались для построения гидродинамических сеток и последующих расчетов времени и скорости закисления. Достоверность измеряемых электрических показателей обеспечивалась балансовым заданием граничных условий II рода, а точность проверялась балансовыми расчетами по закону Кирхгофа для электрических цепей (по варианту с самораспределением расхода по совершенной галерее).

В процессе моделирования изучалась структура подземного потока растворов, формирующихся при включении в работу протяженных коллекторов различной длины и проницаемости. Полученная в результате решения начального варианта гидродинамическая картина потока в пределах опытно-промышленного участка показала симметричное распространение растворов по единичным гидродинамическим ячейкам поля. Поэтому для удобства расчета показателей принята ячейка размерами 12,5 × 45 м.

Время продвижения растворов между технологическими скважинами рассчитывалось конечно-разностным методом с помощью известной зависимости по

основным лентам тока, выделенным на гидродинамических сетках с учетом самораспределения расхода по длине протяженного коллектора:

$$t_i = \frac{P_{\text{эф}}}{k} \sum_{i=0}^n \frac{\Delta l_i^2}{\Delta U_i},$$

где $P_{\text{эф}}$ – эффективная пористость пласта, доли ед., $P_{\text{эф}} = 0,2$; k – коэффициент фильтрации, м/сут; Δl_i – расстояние между соседними эквипотенциалами данной ленты тока, м; ΔU_i – разность потенциалов на участке ленты тока длиной Δl_i , м; n – число ячеек в ленте тока.

Построение лент тока определялось условием равенства расходов, поступающих в каждую из них из протяженных коллекторов, $Q_{\text{нТ}} = 6,25$ м³/сут (0,25 мА). Для расчетов геотехнологических показателей было принято равномерное распределение запасов полезного компонента в полуячейке. Таким образом, время отработки полуячейки для 80 % извлечения ее запасов определяется по формуле:

$$T_{80\%} = Nt,$$

где N – число циклов.

Расчет удельного расхода реагента на единицу массы извлекаемого полезного компонента осуществляется по формуле:

$$K = \frac{\bar{C}QT_{80\%}}{P_{80\%}},$$

где \bar{C} – средняя концентрация реагента, $\bar{C} = 10$ г/л; Q – расход реагента технологической скважины, поступающего в полуячейку, $Q = 50$ м³/сут, %; $P_{80\%}$ – извлекаемые запасы ячейки.

Средняя концентрация (содержание) полезного компонента в продуктивных растворах определяется по формуле:

$$\bar{C} = \frac{P_{80\%}}{QT_{80\%}}.$$

Время распространения растворов является важнейшим геотехнологическим показателем, характеризующим закисление и проработку продуктивного горизонта [5, 6].

В любой ячейке пласта раствор движется с максимальными скоростями по кратчайшим лентам тока между технологическими скважинами, что происходит под влиянием действующих в этом направлении наибольших градиентов напора.

Удаленность рабочих частей скважин от границ пласта (ячейки) и связанное с этим растекание растворов приводит к разубоживанию, неравномерной проработке пласта и образованию так называемых застойных зон, движения в которых почти не происходит, что исключает такие зоны из сферы эксплуатации.

Оптимальные случаи – совершенные галереи, соединяющие скважины в откачных и закачных рядах, – технически невозможны. Поэтому протяженные коллекторы позволяют в известной степени приблизить решение задачи равномерной отработки пластовых залежей.

В то же время идеальные по размерам (длине и ширине) и проницаемости коллекторные полости не могут быть созданы практически. В реальных условиях

всегда будут иметь место непредсказуемые отклонения проектных параметров протяженных коллекторов, обусловленные невыдержанностью их размеров и невозможностью добиться равномерной проницаемости.

В связи с некоторыми условно принятыми исходными показателями ($P_{80\%} = 400$ кг; $N = 8$; $C = 10$ г/л) сравнительную оценку полученных зависимостей удобнее выполнить в относительных единицах, приняв за основу показатели начального варианта (без протяженных коллекторов).

Цель опытно-промышленных работ по сооружению участков с протяженными коллекторами – создание и освоение технологии и технического оснащения строительства протяженных коллекторов, освоение системы ПВ с вертикальными протяженными коллекторами в рядах технологических скважин.

Основные задачи опытно-промышленных работ:

- сооружение специальных скважин для коллекторов;
- применение в качестве фильтрующего материала гранулированного полиэтилена как инертного по отношению к действию серной кислоты и имеющего положительную плавучесть материала, что не требует применения высоковязких жидкостей для доставки в крылья коллекторов материалов с высоким удельным весом;
- определение параметров процесса возникновения зон повышенной проницаемости и режимов основных технологических процессов.

Для прогнозирования параметров давления разрыва была теоретически решена следующая задача: в массив через вертикальные щели нагнеталась жидкость под давлением P .

В полярной системе координат (r, β) распределение радиальных, тангенциальных и касательных напряжений имеет вид:

$$G_{rr} = G_{cr} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right] + C_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 + 2 \sum_2^{\infty} C_n \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \cos n\beta +$$

$$+ \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right] \sum_2^{\infty} n C_n \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \cos n\beta;$$

$$G_{\beta\beta} = G_{cr} \left[1 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right] - C_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 + 2 \sum_2^{\infty} C_n \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \cos n\beta -$$

$$- \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right] \sum_2^{\infty} n C_n \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \cos n\beta;$$

$$G_{r\beta} = \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right] \sum_2^{\infty} n C_n \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \sin n\beta,$$

где $C_0 = \frac{P_0 \alpha_0}{\pi}$; P_0 – атмосферное давление; $C_n = C_{-n} \frac{P_0}{\pi n} \sin \alpha$, $n = 2, 4, 6, 8 \dots$;

$G_{cr} = \lambda \gamma H$ – боковое горное давление; r_0 – радиус скважины; r – расстояние от оси скважины; β – полярный угол; G_{rr} , $G_{\beta\beta}$ – нормальные радиальные и тангенциальные напряжения; $G_{r\beta}$ – касательные напряжения; α_0 – половина угла раствора щели; λ – коэффициент бокового распора пород; H – глубина интервала обработки.

Зная распределение напряжений в массиве, можно определить главные напряжения G_1 и G_2 по следующим формулам:

$$G_{1,2} = \frac{G_{rr} + G_{\beta\beta}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{G_{rr} - G_{\beta\beta}}{2}\right)^2 + G_{r\beta}^2}.$$

Для определения критического давления разрыва был выбран следующий критерий:

$$\begin{aligned} (G_{\max} - G_{\min})^2 + 8T_0(G_{\max} + G_{\min}) &= 0, & \text{если } 3G_{\min} + G_{\max} > 0; \\ G_{\min} &= T_0, & \text{если } 3G_{\min} + G_{\max} < 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где G_{\max} – максимальное главное напряжение; G_{\min} – минимальное главное напряжение; T_0 – критическое напряжение на разрыв при растяжении.

Таким образом, при соблюдении приведенных условий в горном массиве произойдет нарушение.

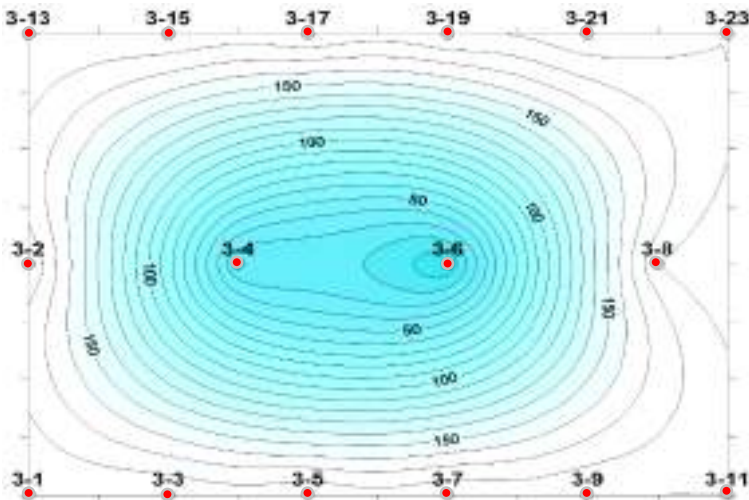


Рис. 1. Пути растекания растворов подземного выщелачивания урана: цифры на осях – номер блока, номер скважины

Обработка решения проводилась с применением программы Matlab. По формуле (1) рассчитывалась функция разрушения ψ при следующих входных данных: $G_{cr} = 0,93$ МПа; $\alpha_0 = 0,3125$ рад; $T_0 = 2,25$ МПа; $P_0 = 4,0; 5,0; 6,0$ МПа.

Для выборочных модулей функции разрушения построены изолинии. На рис. 1 изображены изолинии $\psi = -0,51; -1,05; -2,13; -2,44$ при давлении нагнетания 4,0 МПа. Знак «минус» в данном случае указывает на то, что порода окружающего массива находится в предкритическом состоянии равновесия. Как видно из рисунка, по мере приближения к стенкам скважины ψ стремится к нулю, т. е. к состоянию нарушения сплошности. На стенке скважины, на срединной оси, функция ψ принимает свое минимальное значение для давления 4,0 МПа и равна $-0,51$, что очень близко к нулю [7, 8].

Тем не менее разрушения массива еще не происходит. С повышением давления до 5,0 МПа на стенке скважины появляется точка, координаты которой $(r_0, 0)$ имеют уже положительное, близкое к нулю значение функции разрушения

$\psi = 0,15$. Это свидетельствует о том, что при значениях $P_0 = 4,8-5,0$ МПа на стенке скважины (на оси с углом 0° при принятой на рисунке ориентации щелей) появляется поверхность разрушения или трещина гидроразрыва. И наконец, на рис. 1 при давлении 6,0 МПа поверхность разрушения охватывает значительную зону, по размеру приблизительно равную размеру полукруга с радиусом $(1,3-1,4)r_0$, где r_0 – радиус скважины. В этом диапазоне давлений (5,0–6,0 МПа) полость начинает быстро развиваться, и в массиве образуется магистральная трещина, вследствие чего давление на забое резко падает. Таким образом, для данного вида воздействия на забой и при принятых прочностных характеристиках окружающих пород трещина в массиве начинает возникать при критическом давлении разрыва около 5,0 МПа, что согласуется с экспериментом, проведенным на скважине, где давление разрыва составило 5,0 МПа.

С повышением прочностных характеристик пород, а именно критического напряжения на разрыв $T_0 = 5,7$ МПа, что характерно для цементного камня, образовавшегося в результате длительного простоя скважин, картина изолиний для функции разрушения идентична изолиниям на рис. 1 для давлений вплоть до 10,5 МПа. И только при давлении 11,0 МПа в цементном камне начнет развиваться трещина, которая его разрушит.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комплексы подземного выщелачивания / И. Г. Абдульманов [и др.]. М.: Недра, 1992. 264 с.
2. Абрамов С. К., Алексеев В. С. Забор воды из подземного источника. М.: Колос, 1980. 256 с.
3. Алексеев В. С., Гаврилко В. М., Гребенников В. Т. Рекомендации по восстановлению производительности скважин реагентными методами. М.: НИИ ВОДГЕО, 1975. 275 с.
4. Алексеев В. С., Гребенников В. Т. Восстановление дебита водозаборных скважин. М.: Агропромиздат, 1987. 315 с.
5. Алексеев В. С., Ткаченко В. П. Оценка изменения фильтрационных свойств призабойных зон скважин при различных способах их бурения и освоения // Труды НИИ ВОДГЕО. 1972. Вып. 3. С. 90–92.
6. Аликулов Ш. Ш., Маркелов С. В., Нарзиев А. С. Кольматация пород продуктивного горизонта при подземном выщелачивании урана // ГИАБ. 2011. № 3. С. 239–241.
7. Аликулов Ш. Ш., Маркелов С. В., Халимов И. У., Баймурзаев Х. Р., Казаков. Т. А. Влияние химической кольматации порово-трещинного массива на производительность блоков подземного выщелачивания // ГИАБ. 2011. № 6. С. 211–215.
8. Халимов И. У. Совершенствование технологии скважинного подземного выщелачивания на основе развития процесса гидравлического разрыва пласта: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 92 с.

Поступила в редакцию 15 января 2018 года

RESEARCH AND IMPLEMENTATION OF THE METHODS OF LIMITING THE DIFFLUENCE OF PRODUCT SOLUTIONS AND THE INTENSIFICATION OF UNDERGROUND LEACHING WORKFLOWS

Alikulov Sh. Sh., Sobirov Zh., Khaidarova M. E. – Navoiy State Mining Institute, Navoiy, Republic of Uzbekistan.
E-mail: sharofovich@mail.ru

In this paper, the results of modeling based on the 3D MAX program are presented. The simulated experimental-industrial sector is located on the block of the field. The site includes nine technological wells (six injection wells and three extraction wells) with vertical extended collectors. The simulated site is confined to the central part of the productive horizon, the sole of which lies at a depth of 95–97 m, the upper and lower water bodies are sustained, lithological windows are absent. In the process of modeling, the structure of the underground flow of solutions has been studied, which are formed when long collectors of various lengths and permeability are being involved in operation. The hydrodynamic flow pattern obtained within the experimental-industrial sector, obtained as a result of the solution of the initial variant, showed the symmetric propagation of solutions over single hydrodynamic cells of the field.

Key words: collector; uranium leaching; modeling; filtration coefficient; depth of ore body; productive horizon.

REFERENCES

1. Abdul'manov I. G., and others. *Kompleksy podzemnogo vyshchelachivaniia* [Complexes of underground leaching]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 264 p.

2. Abramov S. K., Alekseev V. S. *Zabor vody iz podzemnogo istochnika* [Water withdrawal from the underground source]. Moscow, Kolos Publ., 1980. 256 p.
 3. Alekseev V. S., Gavrilko V. M., Grebennikov V. T. *Rekomendatsii po vosstanovleniiu proizvoditel'nosti skvazhin reagentnymi metodami* [Recommendations on the wells capacity restoration with reagent methods]. Moscow, NII VODGEO Publ., 1975. 275 p.
 4. Alekseev V. S., Grebennikov V. T. *Vosstanovlenie debita vodozabornykh skvazhin* [Water supply wells production rate restoration]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 315 p.
 5. Alekseev V. S., Tkachenko V. P. [Estimation of filtration properties alteration of wells borehole zones under various methods of drilling and exploitation]. *Trudy NII VODGEO – Proceedings of All-Russian Scientific Research Institute VODGEO*, 1972, issue 3, pp. 90–92. (In Russ.)
 6. Alikulov Sh. Sh., Markelov S. V., Narziev A. S. [Productive horizon rock colmatage at the underground uranium leaching]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. 3, pp. 239–241. (In Russ.)
 7. Alikulov Sh. Sh., Markelov S. V., Khalimov I. U., Baimurzaev Kh. R., Kazakov T. A. [The influence of chemical colmatage of porous-fissured massif on the capacity of underground leaching blocks]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. 6, pp. 211–215. (In Russ.)
 8. Khalimov I. U. *Sovershenstvovanie tekhnologii skvazhinnogo podzemnogo vyshchelachivaniia na osnove razvitiia protsessa gidravlicheskogo razryva plasta: dis. kand. tekhn. nauk* [Development of the technology of downhole underground leaching based on the development of the process of hydraulic seam fracturing. Cand. eng. sci. diss.]. Moscow, 2013. 92 p.
-