

УДК 622.775 (575.2) (04)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УРАНА ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ

Н.С. Турсбеков

Рассматривается скважинное выщелачивание при отработке месторождений урановых руд как один из способов их освоения и промышленной эксплуатации.

*Ключевые слова:* уран; подземное выщелачивание; ураново-рудная провинция.

Центральноазиатские урановые месторождения региональных зон пластового окисления относятся к геологическим природным объектам, образование которых связано с инфильтрацией кислородосодержащих вод по проницаемым осадочным породам мела и палеогена. Сосредоточены месторождения в Шу-Сарысуйской, Сырдарьинской и Илийской урановорудных провинциях (Республика Казахстан) и Кызылкумской провинции (Республика Узбекистан) [1, 2].

Шу-Сарысуйская урановорудная провинция состоит из месторождений Уванас, Канжуган, Мынкудук, Инкай, Жалпак, Буденовское, Акдала, Моинкум, Торткудук и Шолак-Эспе. Региональные фронты пластового окисления Шу-Сарысуйской провинции образуют три последовательно сменяющие друг друга дугообразные ураноносные извилистые полосы. Юго-Восточная полоса включает месторождения Уванас, Торткудук, Моинкум и Канжуган. Центральная – месторождения Жалпак и Шолак-Эспе, Северо-Западная – месторождения Мынкудук, Акдала, Инкай, Буденовское [2, 3].

Промышленные отложения урана на пластово-инфильтрационных месторождениях Шу-Сарысуйской провинции сосредоточены в песчано-глинистых образованиях мел-палеогена мезозой-кайнозойского периода. Продуктивные пласты имеют хорошую обводненность. Глубина их залегания колеблется от 100 до 700 м и более. Подземные воды хлоридо-сульфатно-натриевые, коэффициент фильтрации – от 4 до 15 м/сут. Руды сульфатно-коффинитовые (~55 %), углисто-сульфатно-коффинитовые (~22 %), лейкоксеновые (~19 %). Урановая минерализация прослеживается визуально от серого (бедные руды) до черного (богатые руды) цвета пород и представлена коффинитом, урановыми чер-

нями, реже настураном. Настуран представлен ассоциацией двуокиси четырехвалентного ( $UO_2$ ) и трехокиси шестивалентного урана ( $UO_3$ ) с переменным составом и коффинит-силикатом четырехвалентного урана ( $USiO_4$ ). Подавляющая часть урановых руд Шу-Сарысуйской провинции локализуется в практически бескарбонатных высокопроницаемых отложениях. Карбонатность по  $CO_2$  не превышает 0,1–0,5 %. Из сопутствующих компонентов в заметных концентрациях встречаются селен и рений.

Определенные трудности для выщелачивания встречаются на месторождениях северо-западной рудной полосы (Мынкудук, Акдала, Инкай). Здесь отдельные рудные тела иногда лишены верхнего, а на удалении от фундамента и нижнего водоупоров. На месторождениях юго-восточной полосы наблюдаются случаи переток напорных вод нижнего горизонта через разрывы промежуточного водоупора.

Благодаря высокой проницаемости рудовмещающих отложений, наличию регионального нижнего водоупора, высокой продуктивности рудных залежей, а также верхнего водоупора и пластовых вод, не представляющих питьевой и хозяйственной ценности, создаются благоприятные экологические условия для освоения перечисленных месторождений.

Опытно-промышленная отработка месторождений Шу-Сарысуйской провинции начата в 1977 г. В настоящее время месторождения Канжуган и Уванас практически дорабатываются, основные работы разворачиваются на месторождениях Акдала и Мынкудук. Добыча ведется способом серноокислотного подземного скважинного выщелачивания предприятиями Степное (Уванас, Мынкудук) и Центральное рудоуправления (Канжуган, Моинкум).

Административно эти рудоуправления расположены в Сузакском районе Южно-Казахстанской области. Центральное рудоуправление базируется в пос. Таукент с северо-восточной стороны хребта Кара-Тау. Степное рудоуправление находится в пос. Степное в 180 км севернее пос. Таукент.

Сырдарьинская урановорудная провинция расположена в пойме среднего течения р. Сырдарья и является наиболее обжитым, хозяйственно освоенным районом.

Сырдарьинская провинция урановых пластово-инфильтрационных месторождений представлена:

- северной группой – месторождения Ирколь, Карамурун, Харасан;
- южной – Заречное, Асарчик, Жауткан;
- восточной – Кызылколь, Чаян, Лунное.

Сырдарьинская и Шу-Сарысуйская провинции в геологическом отношении представляют собой единое целое, разделенное хр. Кара-Тау на орогенном этапе его развития [1]. Рудоносные отложения мезозоя-кайнозоя состоят из верхнемеловых (турон-маастрихт), палеогеновых (верхний палеоген-эоцен) и неоген-четвертичных образований.

Геохимический тип пород по меловому разрезу представлен серо-цветными песчаниками, по палеогену – доломитами, мергелями, глиной, ангидритами и гипсом, по неоген-четвертичным образованиям – глиной, алевритом, песками и грубообломочным пролювием. В гидрогеологическом отношении район представляет собой часть Сырдарьинского артезианского бассейна. Подземные воды – слабоминерализованные и пресные. Фронты пластового окисления представляют собой продолжение таких же фронтов Шу-Сарысуйского района, разорванных хр. Кара-Тау и характеризуются меньшей протяженностью и выдержанностью. Особенностью месторождений района является их более резко выраженная полиэлементность. Основными спутниками урана являются селен, молибден и ванадий, встречаются рений и скандий.

Рудные залежи месторождений локализируются в основном в сероцветных песках и песчаниках с содержанием органического углерода 0,1–0,2 % и более. От поверхности рудоносные слои надежно гидроизолированы мощным глинистым водоупором. Нижний глинистый водоупор достаточно выдержан по площади.

Рудные залежи располагаются на глубинах 400–450 м (месторождение Северный Карамурун) и достигают 600–670 м на месторожде-

нии Южный Карамурун. Особенностью месторождений является высоконапорный характер пластовых вод, а также повышенная (до 42 °С) температура, что способствует интенсификации процесса выщелачивания. Освоение урановых месторождений Сырдарьинской группы было начато в 1977 г., для чего было создано рудоуправление № 6, расположенное в Кызылординской области вблизи районного центра – г. Шиели. В данное время отрабатываются месторождения Северный и Южный Карамурун.

Илийская урановая провинция включает в себя ураново-угольные месторождения Нижнеилийское и Кольджат, а также пластово-инфильтрационное месторождение Сулучекинское. Промышленных предприятий в провинции пока нет.

Кызылкумская урановая провинция расположена на территории Республики Узбекистан, находится в Сырдарьинско-Амударьинском междуречье, насчитывает 18 урановых месторождений, образующих несколько обособленных групп:

- северную – Учкудук, Сугралы и др.;
- центральную – Лявлякан, Бешкак, Букинай, Кенимех и др.;
- южную – Кетменчи, Сабырсай.

Общая протяженность рудоносной полосы с СЗ на ЮВ составляет более 300 км [1]. Месторождения отрабатываются Госконцерном “Кызылкумредметзолото” (прежнее название Навоийский горно-металлургический комбинат). Часть месторождений – Букинай, Кенимех и др., до распада СССР отрабатывалась Ленинабадским горно-химическим комбинатом (Таджикистан). Рудоносные отложения северной группы месторождений приурочены преимущественно к туронским слоям, центральной – к туронским, сантон-коньякским и кампан-маастрихтским. Южная группа месторождений характеризуется развитием оруднения преимущественно в нижней части разреза: от апта-альба до верхнего турона.

В гидрогеологическом отношении район, в отличие от ураново-рудных провинций Казахстана, не является единым артезианским бассейном, а образован системой сравнительно небольших бассейнов, которые характеризуются интенсивным инфильтрационным обменом с разгрузкой пластовых вод по зонам разломов. Геотехнологические условия месторождений северной группы в своих общих чертах схожи с условиями месторождений Сырдарьинской урановорудной провинции.

Отрабатываются месторождения подземным скважинным выщелачиванием по схемам, аналогичным применяемым на месторождении

ях Казахстана. Естественно, что экологические проблемы при отработке месторождений Кызылкумской провинции также аналогичны казахстанским.

Отработка на всех месторождениях Казахстана и Узбекистана организована по эксплуатационным блокам (10–60 технологических скважин) с подачей выщелачивающих растворов в закачные скважины, подъем продуктивных растворов через систему откачных скважин, транспортировка их в сборники, поступление на сорбцию и т. д.

Обвязка (подготовка к эксплуатации) добычных блоков включает:

- прокладки или наращивание магистральных технологических трубопроводов (для выщелачивающих растворов, сбора продуктивных растворов, подачи кислоты и сжатого воздуха);
- монтаж трубопроводов в блоках вдоль откачных и закачных рядов скважин, погружных насосов, пусковой электроаппаратуры и кабельных линий;
- сооружение типовых узлов закисления (ТУЗ) и соединение их с магистральными трубопроводами;
- монтаж оголовков скважин и обвязка их с рядными трубопроводами.

Для магистральных трубопроводов используются полиэтиленовые и нержавеющие стальные трубы  $\varnothing = 530, 425, 373, 219, 108$  мм, а рядных внутри блоков – полиэтиленовые трубы –  $315 \times 17,0; 225 \times 12,5; 160 \times 9,1$ . Для подачи концентрированной серной кислоты и сжатого воздуха применяются обычные стальные трубы.

В последние годы проводятся мероприятия по более широкому использованию при обвязке полимерных труб и различных шлангов. Внедрена в опытный порядок система подачи и сбора растворов по американскому опыту, когда каждая скважина соединена с ТУЗ самостоятельной ниткой, заглубленной в грунт. В этом случае на поверхности работающего участка полностью отсутствует какая-либо сеть трубопроводов.

Закисление добычного блока заключается в подаче растворов с повышенной концентрацией кислоты до создания соответствующей геохимической обстановки в рудном горизонте ( $\text{pH} = 2,0–2,5$ ). Момент окончания закисления блока жестко не фиксируется и длится от 20 до 80 дней. Уточняется окончание закисления блока количеством поданной кислоты на 1 тонну закисляемой горно-рудной массы (от 2,5 до 7,0 кг/т) или появлением устойчивых минимально про-

мышленных содержаний урана в большинстве откачных скважин блока. Активное выщелачивание ведется после закисления в том же гидродинамическом режиме, но с постепенным (в 2–3 этапа) уменьшением концентрации кислоты в выщелачивающих растворах.

Заключительная операция процесса выщелачивания – отмывка – осуществляется маточными растворами сорбции с остаточной кислотностью 1–2 г/л без дополнительного подкисления.

Для периодического восстановления дебита скважин применяются химические и механические способы декольматации фильтров и прифильтровой зоны:

- обработка более концентрированными кислотными составами;
- разрыхление кольяментов пневмоимпульсными установками (АСН-ПСВ) с последующей эрлифтной прокачкой;
- очистка скважин от песка установками УОС-ПСВ;
- другие ремонтно-восстановительные работы.

Контроль за целостностью обсадных колонн, определение наличия или отсутствия затрубных перетоков кислых растворов, контроль за работой фильтров по длине осуществляется комплексом геофизических исследований скважин.

Скважины являются основным звеном в техническом оснащении предприятий подземного выщелачивания. Удельный вес затрат на бурение в конечной продукции составляет 15–30 % в зависимости от глубины залегания месторождения.

Подземное выщелачивание, возникшее как идея в 50-х гг. XX в. в США, сегодня превратилось в признанный метод получения урана, конкурентоспособный по отношению к традиционному подземному и открытому способам.

В течение последних лет ведущими странами в освоении и промышленной эксплуатации урановых руд способом подземного выщелачивания остаются США и страны СНГ, среди которых ведущую роль по объемам производства играют Казахстан и Узбекистан.

По достоверно разведанным запасам урана Казахстан занимает одно из первых мест в мире, причем 75,3 % из них относятся к пластово-инфильтрационному типу, пригодному для отработки способом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ). Начиная с 1998 г. практически весь уран, произведенный в Казахстане, был добыт методом ПСВ.

В 2007 г. Казахстан вышел на 3-е место в мире по выпуску природного урана (6000 т/год), ведется добыча урана в трех рудоправле-

ниях и совместных предприятиях Инкай, Катко, Заречное, а также на месторождении Акдала.

Основа устойчивости добычи урана – крупнейшая в мире сырьевая база, наличие передовых технологий добычи урана, отработанная технология реконверсии урана и производства топливных таблеток. Это позволило Казахстану планировать рост добычи природного урана до 10000 т/год уже к 2010 г., тем более к этому времени ожидался дефицит природного урана до 7000 т/год с дальнейшим его ростом.

Исходя из изложенного, становятся понятными значимость и актуальность в решении многочисленных задач, возникающих при подземном скважинном выщелачивании урана. Из множества пока нерешенных задач избрана одна из актуальных – оптимизация коэффициента извлечения урана из продуктивных пластов при его подземном скважинном выщелачивании.

Коэффициент извлечения урана из продуктивных пластов есть нелинейная функция времени, из которой следует, что при коэффициенте извлечения  $\varepsilon \geq 0,75$  эта функция медленно возрастает по времени ( $T$  – отработка блока). Возникает вопрос – когда можно и нужно остановить процесс выщелачивания в блоке?

В этой связи предлагается аналитическая зависимость коэффициента извлечения в функ-

ции от второй кинетической константы  $T_0$  – времени достижения максимума содержания  $C_{np}$  металла в продуктивном растворе ячейки, которая позволяет оптимизировать коэффициент извлечения урана.

$$C_1 \times T_0 \times e = 1, \quad (1)$$

откуда

$$T_0 = \frac{1}{e \cdot C_1} = \frac{0.386}{C_1}, \quad (2)$$

где  $C_1$  – первая кинетическая константа, 1/год;

$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{(1 + \frac{t - t_3}{T_0})}{\exp(\frac{t - t_3}{T_0})}, \quad (3)$$

где  $t_3$  – время закисления ячейки, лет.

### Литература

1. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет. М.: Гостоптехиздат, 1949. 628 с.
2. Языков В.Г. Геотехнология урана на месторождениях Казахстана / В.Г. Языков, В.Л. Забазнов, Н.Н. Петров и др. Алматы, 2001. 442 с.
3. Языков В.Г. Геотехнология металлов / В.Г. Языков, Е.И. Рогов, В.Л. Забазнов и др. Алматы, 2005. 393 с.