
ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНЫХ ОТХОДОВ УРАНОВЫХ РУДНИКОВ С ПОМОЩЬЮ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ*

Т.В. Чекушина, Е.В. Чекушина

Кафедра нефтепромысловой геологии,
горного и нефтегазового дела
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов,
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В статье рассмотрены вопросы загрязнения окружающей среды уранодобывающей промышленностью. Разработана теоретическая модель взаимодействия масс и полей. Оценена критическая скорость потока выщелачивающего раствора. Был проведен анализ научных исследований и данных практики.

Ключевые слова: добыча и переработка урановых руд, максимальное извлечение урана, механизм выщелачивания, окружающая среда.

Уранодобывающая промышленность является значительным загрязнителем окружающей среды: так, при добыче на рудниках и последующей переработке на гидрометаллургических заводах только 75% урана извлекается в конечный (для этих стадий) продукт, а 25% остается в горной массе отвалов и хвостохранилищ, загрязняя с течением времени окружающую среду, в виде рассения (пыления или поступаая в подотвальные воды урановых рудников).

В настоящее время в России, Украине, Казахстане, Узбекистане, Киргизии и Таджикистане накоплены значительные объемы минеральных отходов урановых рудников — отвалов и хвостохранилищ. Так, только за время эксплуатации ОАО «ППГХО» (с 1968 г.) на его промышленной площадке были накоплены радиоактивные минеральные отходы (добычи и переработки урановых руд), содержащие естественные долгоживущие радионуклиды.

Эти отходы в открытом виде складировются на земной поверхности и ежегодно пополняются новыми объемами (ППГХО):

— твердые (руды с некондиционным содержанием урановых минералов) расположены на специальных площадках в виде 12 отвалов;

— жидкие (пульпообразные хвосты гидрометаллургического производства) размещены в двух хвостохранилищах.

* Статья написана с использованием материалов работы, проводимой в рамках выполнения государственного контракта № 02.740.11.0681 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы; научно-исследовательские работы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области переработки и утилизации техногенных образований и отходов» шифр 2010-1.1-222-039 по теме: «Разработка ресурсосберегающей технологии управляемой природной переработки минеральных отходов урановых рудников» (шифр заявки «2010-1.1-222-039-084»).

В настоящее время объем накопленных РАО ППГХО составляет:

- в отвалах около 6 млн м³;
- в хвостохранилищах около 44 млн м³.

Суммарная активность РАО на период окончания деятельности ОАО «ППГХО» составляет около $6 \cdot 10^5$ Бк ($1,6 \cdot 10^5$ Ки).

Другим примером может служить радиэкологическая обстановка в Ставропольском крае, где в хвостохранилище, закрытом в настоящее время урановом руднике N 1, расположенном в 5 км от г. Пятигорска и в 3 км от г. Железноводска (близ г. Лермонтов), заскладировано 12,3 млн м³ отходов уранового производства, с суммарной активностью 45,6 тыс. Ки (его площадь составляет 81,2 га).

На всех работавших до последнего времени российских горных предприятиях по добыче и переработке урановых руд в отвалах и хвостохранилищах находится 108 м³ РАО с активностью $1,8 \cdot 10^5$ Ки.

Известные в настоящее время способы и технологии санации минеральных радиоактивных отходов урановых рудников представляют собой различные модификации механической изоляции хранимой горной массы от окружающей среды. Но эти методы не снижают уровень радиоактивности отходов, что относит их к потенциально опасным длительные годы.

Анализ научных исследований и данных практики показывает, что для эффективной переработки минеральных радиоактивных отходов с довольно низкими (как правило, остаточными) содержаниями урана наиболее целесообразно применять технологии управляемой природной переработки (с довольно продолжительным периодом времени, но позволяющие извлечь уран с низкими концентрациями в горной массе).

С этой целью первоначально были изучены физико-механические и химические процессы разрушения урансодержащей горной массы минеральных отходов урановых рудников, а также обоснованы оптимальные параметры и условия их природного выщелачивания, обеспечивающие максимальное извлечения урана.

Было установлено, что естественное (без техногенного вмешательства) упрочнение минеральной матрицы урансодержащих отходов происходит под проявлением остаточных напряжений (горного давления толщ вышележащего массива) или взрывных напряжений, сил выветривания (прежде всего морозобойного растрескивания), радиоактивных, химических и электрохимических реакций и процессов, что неизбежно приводит к формированию в них зон интенсивной трещиноватости.

Была разработана теоретическая модель взаимодействия масс (заскладированных минералов и горных пород) и полей (обработка растворами реагентов, электрохимическое взаимодействие и т.д.), позволяющая обосновать и детально изучить изменения исходного минерального состава урансодержащих руд и пород, их элементного состава, а также гранулометрического состава и трещиноватости.

В период долговременного хранения и обработки урансодержащей горной массы происходит окисление поверхности минералов, уменьшение ее грануломет-

рического состава и снижение трещиноватости кусков, что было описано и выражено нами путем характерных математических и графических зависимостей.

Между уменьшением гранулометрического состава урансодержащих руд и степенью их трещиноватости была выявлена четко выраженная зависимость, объясняемая тем, что со снижением линейных параметров (уменьшением грансостава) отдельного куска руды происходит и уменьшение количества трещин, так как разрушение кусков руды происходит по имеющимся трещинам и спайностям (как наиболее хрупким деталям архитектуры куска). При существенном уменьшении размеров куска большинство трещин были задействованы на разрушение, т.е. полностью были раскрыты и ликвидированы.

В ходе исследований были математически формализованы процессы разрушения радиоактивных горных пород при их долговременном хранении в отвалах урановых рудников, которые были рассмотрены с позиций теории катастроф и уточнены на основе фрустронной модели их разрушения.

В этих представлениях процесс разрушения горной массы складывается из трех стадий:

- 1) термофлуктуационное зарождение элементарных носителей разрушения;
- 2) их кластеризация в укрупненные трещины (очаги разрушения);
- 3) безактивационный рост очагов до размеров, начиная с которых концентрация напряжений у острия трещины приводит к достижению и превышению предела прочности, в результате чего становится возможным атермическое распространение ее фронта со скоростью звука.

Были исследованы основные процессы разрушения горных пород и руд, хранящихся в отвалах урановых рудников (с выделением соотношения роли в их разрушении предварительных процессов — взрывания, перегрузки и транспортировки), с получением количественного соотношения (вклада) в сравнении с гипергенными процессами выветривания.

Рассматриваемые факторы существенно влияют на гидродинамические и физико-химические процессы, происходящие в отвальных массивах урановых рудников: скорость фильтрации растворов, массоперенос, гомогенные и гетерогенные процессы, осаждение минералов, окислительно-восстановительные и кислотно-основные процессы, сорбцию и десорбцию, комплексообразование и т.п.

В качестве контролируемых параметров управляемого природного выщелачивания минеральных радиоактивных отходов урановых рудников были выбраны: кислотнo-щелочной показатель вод (рН); окислительно-восстановительный потенциал (ОВП); электродный потенциал (Еh); содержание в водах кислорода и растворенных металлов (г/л); время процесса.

Дано теоретическое обоснование механизма управляемого природного выщелачивания урана (основанное на одновременном привлечении таких факторов, как сегрегация материала в период складирования, механического разрушения при долговременном хранении и химического, электрохимического и биохимического растворения) из радиоактивных минеральных отходов урановых рудников, и приведены результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств вмещающих горных пород.

Установлено соотношение влияющих на скорость выщелачивания урана таких факторов, как химические свойства реагента и физико-механические свойства минеральных отходов.

Механизм выщелачивания (химического растворения) урана из руд базируется, как правило, на последовательном протекании следующих основных стадий:

- подвод выщелачивающего раствора к рудной массе (орошение);
- просачивание раствора в пористой рудной среде;
- пропитка рудной массы выщелачивающими растворами;
- окисление урана в руде до легкорастворимого соединения (U^{6+});
- переход легкорастворимого соединения урана в раствор;
- отвод ураносодержащих растворов от рудной залежи.

В ходе лабораторных экспериментов нами было выделено несколько ключевых точек:

- установления механизма выщелачивания (соответствует удельной скорости 2,5 растворения при доле растворенного минерала 0,6);

- бифуркации макромеханизма выщелачивания (точка «микровыбора» системы «руда — растворитель»);

- бифуркации микромеханизма выщелачивания (точки «нановыбора» системы «руда—раствор»);

- окончательного растворения и связанных с ним диффузионных процессов (диффузионный детерминированный хаос в уравновешенной системе «руда—раствор—растворитель»).

В качестве исследуемого фактора, контролирующего эффективность выщелачивания урана из заскладированной горной массы, были приняты характеристики просачивания раствора через обрабатываемый массив, которые определяются имеющимися капиллярно-корпускулярными пустотами.

Теоретически выведено уравнение, позволяющее оценить критическую скорость потока выщелачивающего раствора через характеристики капилляра и раствора, что несомненно имеет практическое значение, а также рассмотрены процессы самоорганизации выщелачивающего раствора, просачивающегося через обрабатываемый рудный массив.

Экспериментально установлено, что изменение концентрации выщелачивающего раствора в жидкой фазе происходит в основном за счет следующих факторов: движения раствора с некоторой средней скоростью, радиального перемешивания раствора, молекулярной диффузии и собственно процесса растворения (выщелачивания) частиц металла, причем проникновение выщелачивающего раствора происходит вначале по основным (хорошо раскрытым) трещинам и капиллярам, а затем по менее раскрытым (слабопроницаемым) трещинам. В связи с этим рудные куски выщелачиваются неравномерно, и процесс контролируется скоростью насыщения их раствором.

Была выведена математическая зависимость, связывающая удельную поверхность обрабатываемых минералов (горной массы) с размерами пор, капилляров и трещин, а также дана типизация всех возможных в горной массе каналов (капилляров, пор и трещин).

В ходе исследований была разработана модель транспортного потока раствора, проходящего через заскладированный и обрабатываемый массив (горную массу), выведенная из нестационарного уравнения Лапласа с учетом функции Бесселя нулевого порядка, а также потенциалов, возникающих на поверхности минералов.

Кроме этого была решена математическая задача о просачивании раствора через заскладированный массив горной массы с использованием интегрального исчисления (аппарата), получением гиперболически убывающей графической зависимости плотности потока выщелачивающего раствора от времени, а также установлен характер зависимости плотности от скорости движения выщелачивающего раствора (также представленный в графической форме).

Исследование оптимальных параметров процессов выщелачивания урана позволило выявить факторы, их определяющие, а также дать количественную оценку их соотношения.

Выщелачивание урана из заскладированных руд определяется структурными и фильтрационными характеристиками обрабатываемого массива, а также свойствами выщелачивающего раствора, объемом и скоростью его продвижения. С точки зрения описания параметров выщелачивания урана наиболее важное значение имеет площадь активной поверхности обрабатываемых минералов.

На основании проведенных исследований были выявлены и описаны инновационные технологии активации горной массы и выщелачивающих растворов, базирующиеся на следующих ее видах: механическая, механохимическая, электромагнитная, электрохимическая и радиационно-химическая.

Среди пяти видов активации только механохимическая активация рудных минералов позволяет достичь высокой степени гомогенизации и значительно интенсифицировать процессы их последующей химической переработки за счет предварительного вскрытия и подготовки к выщелачиванию.

Полученные результаты стали основанием для разработки методики сооружения захораниваемого массива радиоактивных отходов урановых рудников, которая содержит научно обоснованные требования к выбору:

- участка захоронения массива радиоактивных пород;
- его изоляции от окружающей среды;
- свойствам складированной горной массы;
- структуре отвала;
- системе взаимодействия между отдельными слоями массива;
- объему складированных пород.

На основании проведенных исследований были выявлены и предложены инновационные способы утилизации и захоронения радиоактивных пород на урановых рудниках с полезным использованием выделяемого (в результате радиохимических процессов распада трансураниевых элементов) тепла.

В соответствии с требованиями и рекомендациями разработанной методики захоронения радиоактивных минеральных отходов нами были предложены новые технологические способы. В частности, с использованием в качестве экраниру-

ющего самонабухающего слоя глин, с учетом баланса поступления и испарения атмосферных осадков (влаги), созданием особой (чередующейся со слоями глин) структур захораниваемого массива, созданием омоналиченного слоя.

При завершении исследований нами была разработана экспертная система оценки эффективности разработанных технологий складирования и хранения радиоактивных пород (санации урановых рудников).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Воробьев А.Е., Турсунбаева А.К., Чекушина Т.В., Портнов В.С., Чекушина Е.В., Маусымбаева А.Д.* Минеральные радиоактивные отходы: основы управляемого природного выщелачивания и последующего захоронения. — Караганда (Казахстан): Изд-во Казахстанско-Российского университета, 2011.
- [2] *Воробьев А.Е., Чекушина Е.В., Дребенитедт К., Чекушина Т.В., Щелкин А.А.* Геохимия техногенеза отвалов урановых рудников как основа эффективной рекультивации и утилизации заскладированной горной массы. — М.: Изд-во РУДН, 2010.
- [3] *Портнов В.С., Воробьев А.Е., Турсунбаева А.К., Хамитова А.С., Ермек Е.Е., Камаров Р.К.* Влияние природных факторов на отвалы и карьеры урановых рудников. — Караганда (Казахстан): КРУ, 2012.
- [4] ППГХО — реабилитация территорий урановых производств // <http://arguncrisis.ru/documents/2006/ppgxo-reabilitaciya-territorij-uranovyx-proizvodstv>

TREATMENT OF MINERAL WASTE URANIUM MINE BY RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES

T.V. Chekushina, E.V. Chekushina

Department of petroleum geology, mining and oil and gas business
Engineering Faculty
People's Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

In article questions environmental pollution uranium mining industry. A theoretical model of the interaction of the masses and fields. Assess the critical flow rate of leaching solution. In a review of research and data practices.

Key words: mining and processing of uranium ore, the maximum extraction of uranium leaching mechanism, environment.