

10. Забудько Л.М., Лихачев Ю.И., Прошкин А.А. Работоспособность ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1988.
11. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения. М.: Машиностроение, 1981.
12. Захарко Ю.А., Прошкин А.А., Пляшкевич В.Ю. Аналитическое решение линейной теории вязкоупругости применительно к твэлам энергетических реакторов: Препринт ИАЭ-5757/4, 1994.
13. Захарко Ю.А., Прошкин А.А., Шестопалов А.А. Количественно-вероятностный анализ поведения твэлов типа ВВЭР. — Атомная энергия, 1990, т. 68, вып. 3, с. 177—182.
14. Olander D. Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements. University of California TID-26711-P1, 1976.
15. Захарко Ю.А., Прошкин А.А., Шестопалов А.А. Описание методики и программы TEGAS для количественно-вероятностного анализа поведения твэлов энергетических реакторов: Препринт ИАЭ-4945/4, 1989.
16. Горский В.В. Технология изготовления оболочек с барьерным покрытием для твэлов реакторов LWR в США и Японии. — Атомная техника за рубежом, 1988, № 12, с. 25—29.

Поступило в Редакцию 23.10.96

УДК 622.349.5

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАБОТКИ УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ЮЖНОЕ» ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ

Культин Ю.В. (ВНИПИпромтехнологии)

Месторождение «Южное» расположено на северном склоне Алданского щита и является крупнейшим урановым месторождением в Российской Федерации. Признаки ураноносности были установлены в 1959 г., и начатая с того времени его разведка ПГО «Приленскгеология» продолжалась до 1981 г. За это время неоднократно предпринимались попытки обосновать возможность отработки подземными горными выработками, но каждый раз общий результат был отрицательным, поэтому каких-либо работ после 1981 г. не проводилось.

На наш взгляд, имеется реальная возможность осуществить высокорентабельную отработку месторождения подземным выщелачиванием, являющимся к тому же экологически чистым относительно традиционных методов. Этому благоприятствуют его природные особенности.

Месторождение «Южное» приурочено к узкой зоне одноименного названия тектонически дробленных, иногда до перетертости гранитов, гнейсов, кристаллических сланцев и других изверженных пород, являющихся рудовмещающими. Зона имеет среднюю мощность 15 м, угол падения 70°, она прослежена по простиранию более чем на 20 км, на глубину более 2 км.

По минеральному и химическому составу руды месторождения относятся к алюмосиликатному типу с повышенным содержанием сульфидной серы и уголекислоты — в среднем 2,5 и 4,5% соответственно при средних значениях. Из сульфидов около 95% приходится на пирит.

Основным урановым минералом является браннерит (титанат урана), в котором на долю четырехвалентного неокисленного урана приходится примерно 2/3 общего количества урана, на долю шестивалентного окисленного урана — 1/3. Кроме урана в рудах в качестве попутных определены молибден, золото и серебро. Заметное количество приходится на ванадий, титан, ниобий и некоторые другие элементы.

На месторождении и в окружающем его массиве горных пород распространены подземные трещинно-жильные воды. Водопроницаемость массива изучали по данным откачек из 107 гидрогеологических скважин, а также наблюдений за водопритоком в горные выработки. По этим данным коэффициент фильтрации для прогнозных расчетов водопритока при развитии горных выработок принят равным 0,05 м/сут. Отдельно для продуктивной зоны, вмещающей рудные тела и являющейся значительно более трещиноватой и, следовательно, более проницаемой, чем окружающий ее массив ненарушенных тектоническими подвижками горных пород, коэффициент фильтрации не определялся. Однако по данным водопоглощения образцов руды, по данным откачек по одному из пяти участков месторождения (участок Непроходимый), где средний коэффициент фильтрации составил 0,145 м/сут, и по некоторым другим признакам повышенной проницаемости продуктивной зоны ее коэффициент фильтрации будет увеличен по отношению к среднему по массиву в 3—5 раз и составлять не менее 0,2 м/сут. Для сравнения укажем, что такой коэффициент имеют рудовмещающие кварцевые трещиноватые песчаники месторождения Кенигштейн (ФРГ), успешно отрабатывавшиеся в 70—80-е годы подземным выщелачиванием без искусственного дробления руд [1, 2].

Извлечение урана из руд изучено по большому числу технологических проб, измельченных при исследованиях до крупности 1 мм. Опробовали различные схемы и режимы выщелачивания серно-кислыми и содовыми растворами, установлены преимущества серно-кислотного процесса. Сквозное извлечение, учи-

тывающее полный цикл переработки добытых руд, в том числе радиометрическую сортировку, обогащение и гидрометаллургический передел, оценено на уровне 90%. При разведке месторождения пробурено более 2 тыс. скважин (среди них 8 скважин глубиной 1,5—2 км), пройдено подземных горных выработок 52,5 тыс. пог. м. Скважины и горные выработки пройдены в основном без крепления в связи с хорошей устойчивостью горных пород. Породы классифицируются как крепкие и очень крепкие, коэффициент крепости пород по Протодяконову составляет 10—15.

Анализ особенностей месторождения с учетом опыта отработки урановых месторождений подземным выщелачиванием показывает, что на нем могут быть применены обе разновидности метода: блочное подземное выщелачивание дробленых руд и скважинное руд в их естественном залегании. Основными препятствиями для блочного подземного выщелачивания являются большие капитальные затраты, неполнота использования недр, дорогостоящий труд горнорабочих и др. И все же полностью исключать его использование сейчас не следует, к этому вопросу можно вернуться в случае неудачных результатов опробования скважинного подземного выщелачивания, имеющего существенные преимущества.

Известно большое число скважинных систем подземного выщелачивания [2, 3], разработанных, главным образом, для месторождений, приуроченных к рыхлым осадочным породам. Для скальных месторождений известны системы с подачей растворов через скважины, пробуренные с поверхности, фильтрацией растворов через рудоносные трещиноватые граниты и улавливанием этих растворов дренажными штреками, пройденными из штольневого горизонта. Такие системы относят к комбинированным системам разработки [2].

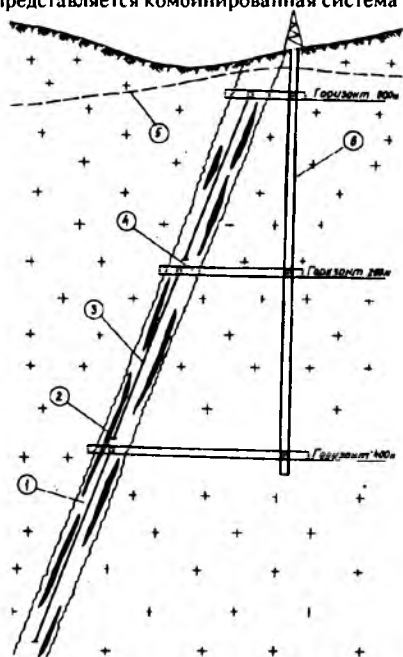
Чисто скважинных систем для отработки скальных месторождений пока не известно, но этому вопросу придется серьезное внимание. Примером может служить постановка опытно-промышленных работ по скважинному подземному выщелачиванию на медном месторождении Санта-Круз в США [4]. Известно, что подготовительные работы по проекту выполнены (сооружены рабочие скважины, проведен комплекс гидрогеологических исследований и др.) и оценены как положительные, однако публикаций о дальнейшей реализации проекта и, главное, о результатах собственно подземного выщелачивания до настоящего времени не появилось. Есть основания сомневаться в положительных результатах проекта, поскольку в его основу положена геотехнологическая схема отработки методом подземного выщелачивания урановых месторождений в рыхлых отложениях и не учитывающая существенные отличия от них скальных месторождений.

Главными отличиями скальных месторождений являются неравномерная трещиноватость (и соответственно проницаемость для выщелачивающих растворов) рудного массива, большая мощность рудных тел, необходимость использования большого количества окислителя, низкая в целом проницаемость рудовещающих пород, прожилково-вкрапленный тип рудной минерализации и др. Кроме того, особенностью месторождения «Южное» является крутопадающее распространение рудных тел и их чрезвычайно большая протяженность в нисходящем направлении.

Исходя из особенностей опыта проектирования и эксплуатации месторождений подземным выщелачиванием, а также технических средств и комплексов [5], рациональной для месторождения «Южное» представляется комбинированная система разработки на основе геотехнологической схемы односкважинного

ведения процесса. Эта схема соответствует природным условиям месторождения «Южное», хотя и разработана для Удоканского месторождения меди [6].

Комбинированная система разработки для месторождения «Южное» иллюстрируется разрезом на рис. 1, на котором показаны продуктивная зона 1, рудные тела 2, геотехнологические скважины 3, полевые горизонтальные горные выработки 4, пройденные вкрест простирания продуктивной зоны, нижняя граница распространения вечной мерзлоты 5, шахтный ствол 6. По этой системе месторождение разрабатывают на три горизонта (или этажа), располагаемых на расстоянии 600 м одно от другого. Оработку месторождения начинают с верхнего горизонта, находящегося на абсолютной отметке +800 м. Здесь после вскрытия продуктивной зоны полевым штреком проходят по простиранию буровой штрек, из которого на расстоянии 25 м одно от другого бурят геотехнологические скважины по падению продуктивной зоны на глубину 600 м. После отработки верхнего этажа месторождения, промывки от выщелачивающих растворов и дренирования окружающих его природных подземных вод приступают к подготовительным работам на горизонте с абсолютной отметкой +200 м и затем к отработке нижерасположенного этажа месторождения такой же системой скважин, что и на верхнем. После отработки этого этажа в том же порядке обрабатывают и самый нижний этаж месторождения.



Р и с. 1. Схема отработки методом подземного выщелачивания крутопадающих рудных тел

Геотехнологическая схема выщелачивания руды односкважинным способом показана на рис. 2, на котором показаны рудное тело 1, открытая часть ствола скважины 2 в рудном теле, воздухоподающая колонна труб 3, раствороподающая колонна труб 4, безрудная порода 5, обсаженная часть скважины 6, поверхность земли (почва бурового штрека) 7, трубопровод 8 для подачи сжатого воздуха в скважину, трубопровод 9 для продуктивных растворов, трубопровод 10 для подачи выщелачивающих растворов в скважину, трубопровод 11 для выпуска воздуха из скважины, линия тока 12 движения растворов в рудном теле и скважине, воздушные пузыри 13, фильтровая часть 14 в раствороподъемной колонне.

После бурения технологической скважины, оборудованной ее трубопроводами и герметичным оголовком по схеме рис. 2 начинают выщелачивание приходящейся на скважину рудной массы, для чего подают в скважину по колонне 3 воздух и по трубопроводу 10 выщелачивающий раствор. В конкретных условиях месторождения «Южное» выщелачивающим раствором является пластовая вода, которая вместе с раствором в ней кислородом воздуха преобразуется в рудном теле в результате окисления сульфидных минералов в серно-кислый раствор с повышенным содержанием сульфата трехвалентного железа, т.е. в раствор, обычно применяемый для выщелачивания урановых руд.

Сульфидных минералов в руде месторождения достаточно, чтобы в течение всего срока отработки рудной массы, приходящейся на одну технологическую скважину, концентрация серной кислоты в образующемся растворе составляла 5—10 г/л. Ориентировочно срок отработки составит 5—10 лет при $j : t = 1$.

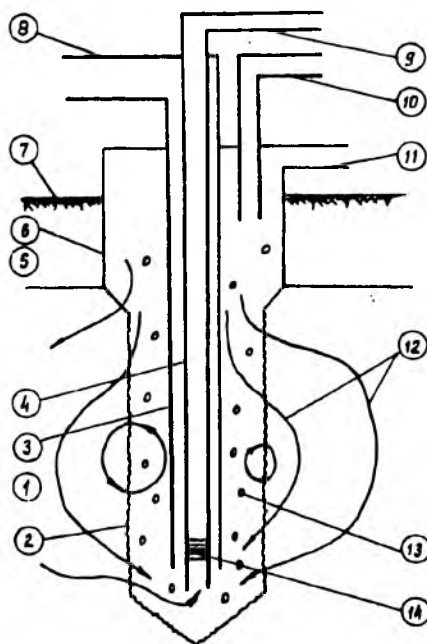
Одновременно с подачей выщелачивающего раствора и в том же количестве откачивают продуктивный раствор по колонне 4, используя часть воздуха из колонны 3. Воздух, поступающий через перфорированную часть колонны 14, создает возможность ведения по ней откачки растворов эрлифтным способом. Большая же часть воздуха, поднимаясь в пространстве между стенками скважины и трубами 3, разобьется в нем выщелачивающие растворы от продуктивных, создавая тем самым между ними газогидродинамическую перемычку. Часть воздуха растворяется в выщелачивающем растворе, попадает вместе с ним в рудное тело и окисляет не только сульфидные, но и рудные минералы, переводя находящийся в них четырехвалентный уран в легкорастворимый шестивалентный. Другая часть воздуха поднимается к устью скважины и выпускается в атмосферу.

Продуктивный раствор, извлеченный из скважины, направляется на сорбционную установку, откуда после извлечения из него урана и находящихся в растворе попутных элементов направляется уже в качестве выщелачивающего раствора по трубопроводу 10 на повторное и затем многократное использование до полного извлечения урана из рудного тела.

Исходя из приведенной системы вскрытия месторождения и технологической схемы отработки, выполнена оценка стоимости добычи 1 кг урана при промышленной отработке месторождения «Южное». В соответствии с выполненной оценкой, как следует из таблицы, себестоимость добычи урана составит 10,5 дол./кг. Низкая стоимость добычи объясняется, во-первых, большим объемом руды, обрабатываемой одной рабочей скважиной. Если для осадочных месторождений, обрабатываемых сетью скважин с ячейкой размером 50×25 м, на одну рабочую скважину приходится площадь продуктивного горизонта 1250 м², то для месторождения «Южное» эта площадь составляет 600×25 = 15 000 м². Соответственно с таким соотношением площадей и при других равных условиях затраты на сооружение технологических скважин оказываются в 10 раз меньшими, чем на осадочных месторождениях. Во-вторых, исключены затраты на серную кислоту, являющуюся основным реагентом для приготовления выщелачивающих растворов при отработке осадочных месторождений. Использование в качестве основного реагента выщелачивающего раствора кислорода воздуха позволило сократить затраты примерно в 3—5 раз относительно пластовых месторождений.

Несмотря на ожидаемую высокую эффективность, освоение подземного выщелачивания для отработки месторождения «Южное» все же следует вести по традиционной трехэтапной последовательности: опробование руд, опытно-промышленная отработка представительного участка месторождения подземным выщелачиванием и промышленная эксплуатация.

Опробование руд имеет целью определение принципиальной возможности отработки месторождения подземным выщелачиванием. Для определения этой возможности выщелачивается относительно небольшой объем руды на месте ее залегания. Опробование проводится без переработки получаемых продуктивных растворов, т.е. полезные компоненты из растворов не извлекаются. Опробование может быть проведено по



Р и с. 2. Схема односкважинного подземного выщелачивания рудных тел с газогидродинамической перемычкой между раствороподающей и раствороприемной частью скважины

схеме рис. 2. Для этого по односкважинным схемам достаточно 1—2 рабочих, 1—2 наблюдательных скважин, 1—3 мес при общей стоимости всех работ 100—200 тыс. дол. Опытнo-промышленная отработка участка проводится для составления технико-экономического обоснования промышленного освоения месторождения. Работы на этом этапе должны быть самоокупаемы. При положительных результатах опытно-промышленного подземного выщелачивания и на их основе разрабатывается технико-экономическое обоснование промышленного освоения, опытно-промышленный участок расширяется и начинается эксплуатация месторождения.

Оценка стоимости добычи 1 кг урана подземным выщелачиванием на месторождении «Южное»

Вид работ	Затраты	
	объем	стоимость, дол.
Проходка горных выработок, пог. м	$2,25 \cdot 10^{-4}$	0,203
Сооружение геотехнологических скважин, пог. м	$3,3 \cdot 10^{-3}$	1,155
Приготовление и подача сжатого воздуха для окисления руды под давлением 60 атм., н.м ³	105	2,1
Затраты сжатого воздуха на откачку продуктивных растворов и их транспортировку на переработку, н.м ³	15	0,3
Затраты энергии на шахтный водоотлив при осушении отработанных горизонтов, кВт·ч	13,6	0,544
Переработка продуктивных растворов и получение промпродукта, м ³	3	3
Переработка промпродукта и получение товарного продукта, кг	1	1
Промывка и очистка промывных вод при рекультивации недр, м ³	1,5	1,2
Ремонтно-восстановительные работы, контроль за качеством проведения природоохранных мероприятий, совершенствование технических средств и способов отработки месторождения и др., чел.·мес	0,002	1

Таким образом, общая продолжительность работ по освоению технологии подземного выщелачивания не превысит сроков, отводимых для этого на осадочных месторождениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисовский Г.Д., Лобанов Д.П., Назаркин В.П. и др. Кучное и подземное выщелачивание металлов. Под ред. С.Н. Волощука. М.: Недра, 1982. 113 с.
2. Добыча урана методом подземного выщелачивания. Под ред. В.А. Мамилова. М.: Атомиздат, 1980. 248 с.
3. Луценко И.К., Белецкий В.И., Давыдова Л.Г. Бесшахтная разработка рудных месторождений. М.: Недра, 1986. 176 с.
4. O'Neil T. In Situ Copper Mining at Santa Cruz: a Projekt Update. — Mining Engng, 1991, v. 4, № 8, p. 1031—1034.
5. Абдульманов И.Г., Фазлуллин М.И., Мосев А.Ф. и др. Комплексы подземного выщелачивания. Под ред. О.Л. Кедровского. М.: Недра, 1992. 263 с.
6. Культин Ю.В. О возможности применения метода подземного выщелачивания для отработки Удоканского месторождения меди. — Цветные мет., 1995, № 8, с. 16—20.