

Н. М. Дербасова¹, М. В. Гавриш¹,
С. Б. Смирнов¹, В. М. Гавриш²

¹Севастопольский национальный университет
ядерной энергетики и промышленности

²Государственное специализированное предприятие
«Чернобыльская АЭС»

Биологическое выщелачивание урана из отходов уранодобывающей промышленности

Рассматривается метод микробиологического выщелачивания урана из хвостохранилищ с помощью ассоциации микроорганизмов.

Ключевые слова: уран, биотехнологии, хвостохранилища.

Н. М. Дербасова, М. В. Гавриш, С. Б. Смирнов, В. М. Гавриш

Біологічне вилугування урану з відходів уранодобувної промисловості

Розглядається метод мікробіологічного вилугування урану з хвостосховищ за допомогою асоціації мікроорганізмів.

Ключові слова: уран, біотехнології, хвостосховища.

Иntenсивное развитие атомной энергетики и гонка вооружений привели к тому, что во всем мире скопились значительные объемы хвостов уранодобывающих предприятий. Размещаемые на поверхности земли отвалы становятся источниками непрерывного и долговременного радиоактивного и химического загрязнения основных компонентов окружающей среды: поверхностных и подземных вод — вследствие вымывания из отвалов атмосферными осадками и поверхностными водотоками токсичных и радиоактивных элементов; атмосферы — за счет выделения радона, который путем диффузии и конвекции переносится на расстояния свыше 4–5 км, и радиоактивной пыли, образующейся в результате физико-химического выветривания и ветровой эрозии приповерхностного слоя перекультивированных отвалов. В процессе добычи для получения 1 т кондиционной руды из отбитой горной массы отделяется большое количество пустой породы и низкосортной (забалансовой) руды, поэтому в отвалах накапливается огромное количество отходов. Данная проблема особенно актуальна для Украины как страны, имеющей на своей территории крупнейшие в Европе хвостохранилища. К примеру, Днепродзержинское и Сухачевское хвостохранилища занимают общую площадь 600 га и содержат порядка 42 млн т «хвостов». Для сравнения: по различным оценкам масса радиоактивных отходов, находящихся внутри аварийного четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС, равна примерно 2,5 млн т (объем — до 1,74 млн м³). При этом общая активность радионуклидов в Чернобыльской зоне составляет менее двух третей активности зоны только Днепродзержинского хвостохранилища. В настоящий момент эксплуатация данных хвостохранилищ представляет собой серьезную экологическую проблему, так как требует значительных финансовых вложений по их содержанию и реконструкции.

В то же время возрастающая стоимость извлечения и переработки металлов из руд наряду с истощением запасов высококачественного минерального сырья и усилением природоохранных мер обусловили необходимость развития новых технологий в горнодобывающей промышленности, которые обладают характеристиками, позволяющими использовать в качестве сырья отходы «классических» способов добычи.

Одной из таких интенсивно развиваемых технологий в настоящее время является микробиологическое выщелачивание как привлекательная альтернатива традиционным физическим и химическим методам обогащения руд благодаря сокращению потребления энергии, транспортных затрат и менее пагубному воздействию на окружающую среду [1]. Промышленное применение железо- и сероокисляющих микроорганизмов с целью извлечения ценных компонентов из руд достигло широких масштабов в разных странах. Различными компаниями стран Северной и Южной Америки, Африки, Австралии используются бактериально химические технологии добычи меди, кобальта, никеля, золота, цинка, урана [2], [4], [5].

Применение микробиологического выщелачивания для переработки хвостохранилищ в перспективе может решить множество экологических проблем и получить ряд ценных материалов из отвалов.

Постановка задачи. Для переработки хвостохранилищ было предложено апробировать различные технологические схемы микробиологического выщелачивания урана из руд и отвальных пород на основе ассоциации микроорганизмов, применявшейся для микробиологической

Таблица 1. Изменение содержания U, Fe²⁺, Fe³⁺, pH в водной фазе при перколяционном и пачуковом выщелачивании блочной и забалансовой руд ш. Ингульская

Условия эксперимента	Концентрация, pH	Сутки														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Блочная руда, перколяционное выщелачивание, Т:Ж = 1:15	U, мг/л	30,4	34,4	33,6	41,0	45,0	-	-	-	49,2	58,2	63,0	-	-	-	63,0
	Fe ²⁺ , г/л	3,84	3,84	1,09	3,95	3,43	-	-	-	4,12	3,57	3,3	-	-	-	3,7
	Fe ³⁺ , г/л	21,13	22,4	22,07	21,9	22,1	-	-	-	22,4	22,4	22,9	-	-	-	22,7
	pH	0,91	0,89	0,95	0,9	1,19	-	-	-	0,92	0,92	0,92	-	-	-	0,94
Блочная руда, пачуковое выщелачивание, Т:Ж = 1:5	U, мг/л	73,0	108,6	108,0	114,0	121,0	-	-	-	114,6	163,8	165,0	-	-	-	168,0
	Fe ²⁺ , г/л	3,56	3,57	3,95	3,82	3,35	-	-	-	3,43	3,16	3,32	-	-	-	3,16
	Fe ³⁺ , г/л	23,7	25,3	25,7	24,9	25,8	-	-	-	25,0	25,9	24,0	-	-	-	24,5
	pH	1,08	1,08	1,16	1,15	0,91	-	-	-	1,21	1,24	1,25	-	-	-	1,3
Опыт сравнения: блочная руда, пачуковое выщелачивание, Т:Ж = 1:5	U, мг/л	32,8	64,8	-	-	-	121,4	145,8	146,4	-	-	-	169,2	169,2	178,0	-
	Fe ²⁺ , г/л	н/о	0,5	-	-	-	0,3	0,5	0,3	-	-	-	0,7	0,5	0,5	-
	Fe ³⁺ , г/л	22,2	23,1	-	-	-	24,3	25,4	23,5	-	-	-	24,5	25,1	25,1	-
	pH	11,7	8→12	-	-	-	11,0	4→12	8,33	-	-	-	7,84	7,35	6,4	-
Забалансовая руда, перколяционное выщелачивание, Т:Ж = 1:15	U, мг/л	14,4	15,4	-	-	-	17,4	11,6	19,0	-	-	-	19,4	21,8	20,6	-
	Fe ²⁺ , г/л	4,09	4,24	-	-	-	3,84	3,84	3,71	-	-	-	3,84	3,95	3,85	-
	Fe ³⁺ , г/л	21,5	21,5	-	-	-	22,3	23,1	22,6	-	-	-	22,8	22,8	22,8	-
	pH	0,91	0,83	-	-	-	0,84	0,84	0,82	-	-	-	0,86	0,89	0,9	-
Забалансовая руда, пачуковое выщелачивание, Т:Ж = 1:5	U, мг/л	42,2	46,0	46,8	52,8	54,0	-	-	-	53,4	54,0	55,5	-	-	-	57,6
	Fe ²⁺ , г/л	4,32	4,39	4,68	4,38	4,12	-	-	-	4,12	4,16	3,98	-	-	-	3,84
	Fe ³⁺ , г/л	21,3	23,4	23,4	23,1	23,2	-	-	-	23,2	24,1	22,7	-	-	-	22,8
	pH	0,87	0,84	0,9	0,86	0,84	-	-	-	0,84	0,86	0,88	-	-	-	0,91
Опыт сравнения: забалансовая руда, пачуковое выщелачивание, Т:Ж = 1:5	U, мг/л	40,0	48,4	-	-	-	53,4	66,0	67,0	-	-	-	59,6	66,0	68,8	-
	Fe ²⁺ , г/л	0,9	0,55	-	-	-	0,82	0,82	0,82	-	-	-	0,82	0,62	0,9	-
	Fe ³⁺ , г/л	22,3	22,6	-	-	-	24,3	24,0	22,1	-	-	-	23,34	22,8	22,8	-
	pH	11,0	10,8	-	-	-	9,1	5→12	10,3	-	-	-	10,3	9,5	9,2	-

Примечание. Стрелкой (→) отмечено закисление рабочих растворов H₂SO₄.

Таблица 2. Химический анализ урановых руд до и после выщелачивания

Показатель	Содержание, %							
	Блочная руда				Забалансовая руда			
	исходная	перколяционное выщелачивание	пачуковое выщелачивание	опыт сравнения: пачуковое выщелачивание	исходная	перколяционное выщелачивание	пачуковое выщелачивание	опыт сравнения: пачуковое выщелачивание
Концентрация U, г/л	86,5 · 10 ⁻³	4,25 · 10 ⁻³	2,05 · 10 ⁻³	2,05 · 10 ⁻³	33,0 · 10 ⁻³	4,0 · 10 ⁻³	1,5 · 10 ⁻³	1,75 · 10 ⁻³
Активность до, Ки/кг	2,19 · 10 ⁻⁶	15,9 · 10 ⁻⁷	8,64 · 10 ⁻⁷	12,4 · 10 ⁻⁷	0,78 · 10 ⁻⁶	4,84 · 10 ⁻⁷	3,62 · 10 ⁻⁷	3,4 · 10 ⁻⁷
Активность после, Ки/кг	10,1 · 10 ⁻⁷	3,27 · 10 ⁻⁷	2,16 · 10 ⁻⁷	2,9 · 10 ⁻⁷	2,8 · 10 ⁻⁷	0,93 · 10 ⁻⁷	1,04 · 10 ⁻⁷	0,89 · 10 ⁻⁷

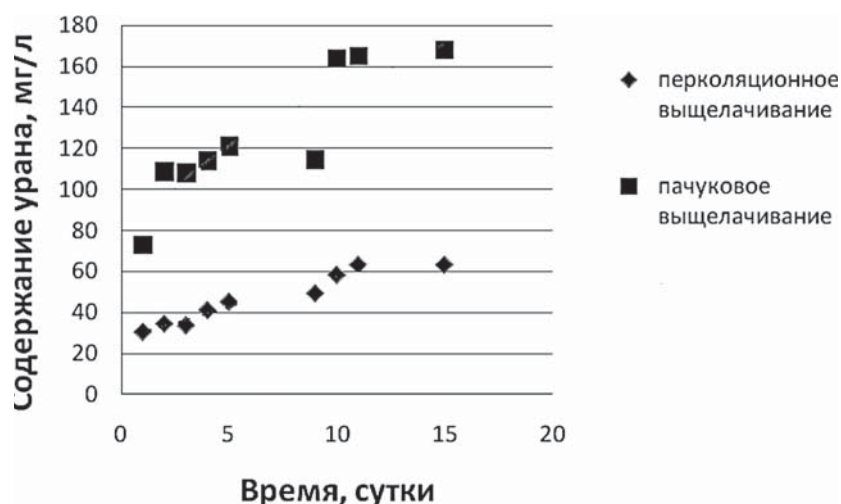


Рис. 1. Изменение извлечения урана при выщелачивании блочной руды в пачуковом и перколяционных режимах

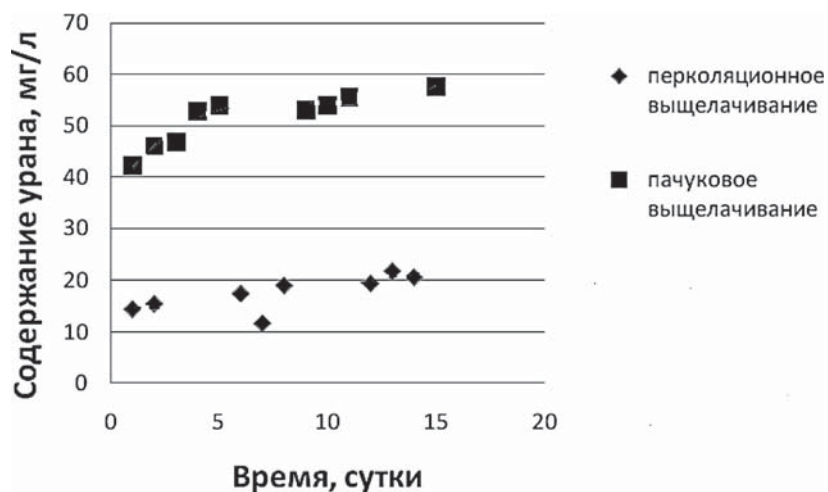


Рис. 2. Изменение извлечения урана при выщелачивании забалансовой руды в пачуковом и перколяционных режимах

деструкции боеприпасов, содержащих тротил и (или) гексоген [3]. Косвенные данные, полученные в результате ранее проводившихся экспериментов, позволили предположить высокую степень выщелачивания различных металлов, в том числе, возможно, и актиноидов. Для проверки этих предположений ГП «ВостГОК» и научно-исследовательской лабораторией биотехнологий и экологического мониторинга Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности была разработана «Программа исследовательских работ по бактериальному выщелачиванию урана из руд и отвалных пород». Проверка данного метода осуществлялась на ГП «ВостГОК» применительно к пачуковому и перколяционному методам выщелачивания.

Методика проведения исследований. В качестве исходных использовались пробы руд Ингульской шахты фракцией от 0,5 до 1,0 мм с исходным содержанием урана от $0,33 \cdot 10^{-3}$ до $86,5 \cdot 10^{-3}$ %, что соответствовало содержанию урана в блочных рудах текущей переработки и в забалансовых рудах.

Выщелачивание урана проводили раствором FeSO_4 (с концентрацией ионов $\text{Fe}^{2+} = 3,6$ г/л; $\text{Fe}^{3+} = 20,59$ г/л, $\text{pH} = 0,8$), содержащим ассоциацию микроорганизмов

рода *Tiobacillus* и ацидофильных бактерий, в пачуковом [соотношение твердой (руды) и жидкой (раствора) фаз Т:Ж = 1:5, температура 25–30 °С] и перколяционном (соотношение фаз Т:Ж = 1:15, температура 25–30 °С) режимах в течение 14–15 сут с периодическим (через 3 сут) отбором проб водной фракции на концентрацию U, Fe^{2+} , Fe^{3+} и pH по методикам, утвержденным ВостГОКом. Для этого к измельченной руде массой 100 г добавляли 300 мл раствора FeSO_4 (с концентрацией ионов $\text{Fe}^{2+} = 0$, $\text{Fe}^{3+} = 5$ мг/л, $\text{pH} = 2,0$) и 50 мл ассоциации микроорганизмов рода *Tiobacillus*. Полученную смесь на протяжении всего периода выщелачивания аэрировали воздухом с расходом 12 л/ч.

Анализ твердых проб выполнялся в начале и в конце испытаний.

Одновременно с проводимыми опытами в качестве контрольного опыта использовали пачуковое выщелачивание урана по принятой на ВостГОКе технологии водным раствором FeSO_4 (с концентрацией ионов $\text{Fe}^{2+} = 0,8$ г/л, $\text{Fe}^{3+} = 21,5$ г/л, $\text{pH} = 0,8$), близким по химическому составу к рабочему раствору, но не содержащим активной культуры микроорганизмов.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 и 2.

По данным, приведенным в табл. 1, для блочной и забалансовой руд с учетом изменения рабочих растворов за счет испарения и отбора ежесуточных проб рассчитаны зависимости изменения извлечения урана от времени выщелачивания (рис. 1 и 2).

Выводы

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что процессы перколяционного и пачукового выщелачивания урановых руд в опробованных условиях характеризуются высокой степенью извлечения урана (94–98 %), что, вероятно, связано не только с действием бактерий, но и с высоким содержанием Fe^{3+} в рабочих растворах по сравнению со стандартным, используемым на ВостГОКе. При этом использование ассоциации микроорганизмов рода *Tiobacillus* и ацидофильных бактерий не требовало подкисления, что, в свою очередь, приводило к снижению расходования H_2SO_4 до 80 и 55 кг/т для блочной и забалансовой руд соответственно (см. табл. 1).

Из представленных данных следует, что скорость извлечения урана при пачуковом выщелачивании выше, чем в перколяционном. Эффективность выщелачивания с использованием микроорганизмов рода *Tiobacillus* несколько выше, чем традиционное выщелачивание. Для блочной руды за 15 сут обработки получено извлечение 97,7 % в пачуковом режиме и 95,1 % — в перколяционном. Для забалансовой руды за 15 сут обработки извлечение урана соответственно составило 94 и 88 %.

Использование микроорганизмов рода *Tiobacillus* и ацидофильных бактерий при незначительном изменении технологического процесса позволит существенно снизить затраты на выщелачивание урана и решить вопросы по безопасному и экологическому пути утилизации отходов хвостохранилищ.

Список литературы

1. *Han C. J.* Physiological studies of extremely thermoacidophilic microorganisms under normal and stressed conditions // Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy. — North Carolina State University, 1998. — 220 p.
2. *Bosecker K.* Bioleaching: metal solubilization by microorganisms // *FEMS Microbiol. Rev.* — 1997. — V. 20. — P. 591–604.
3. Патент України № 12733 от 15.02.06 г. «Спосіб утилізації звичайних боєприпасів, що містять тротил і/або гексоген».
4. *Norris P. R., Burton N. P., Foulis N. A. M.* Acidophiles in bioreactor mineral processing // *Extremophiles.* — 2000. — V. 4. — P. 71–76.
5. *Rawlings D. E.* Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates // *Microbial Cell Factories.* — 2005. — V. 4, № 13. DOI: 10.1186/1475–2859–4–13.

Надійшла до редакції 28.01.2011.