

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА ИЗ СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ РУД НА ПРИМЕРЕ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УЗБЕКИСТАНА

Ш.Ш. Аликулов¹, И.У. Халимов¹

¹ Навоийский государственный горный институт, Навои, Узбекистан, e-mail: sharofovich@mail.ru

Аннотация: Приведены результаты исследования по интенсификации параметров подземного выщелачивания урана на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями. Результаты исследований получены из проведенных опытно-промышленных работ на урановых месторождениях Навоийского горно-металлургического комбината (НГМК). В целях увеличения коэффициента фильтрации продуктивного пласта были применены поверхностно-активные вещества (ПАВ). Впервые в качестве ПАВ для повышения степени извлечения полезного компонента из слабопроницаемых руд методом подземного выщелачивания был использован сульфанол. Применение современных технических средств при подземном выщелачивании позволяет совершенствовать технологию отработки, эффективность которой во многом зависит от природных условий месторождений, каждое из которых уникально и имеет свои особенности. В условиях современной рыночной экономики рациональные технологии добычи полезных ископаемых являются основным решающим фактором, определяющим экономическую целесообразность проведения горных работ. В работе отражены основные направления проводимых работ по комплексному подбору технологии отработки запасов, а также оценен экономический эффект применения на начальной стадии отработки различных технологий. Слабопроницаемые и слабообводненные руды урановых месторождений НГМК долгое время были занесены в технологический забаланс, поскольку высокая реактоёмкость пород и интенсивная кольматация не позволяли эффективно обрабатывать запасы традиционным сернокислотным способом. В связи с этим на начальном этапе исследовались геологические и технологические особенности добычи урана из слабопроницаемых и слабообводненных руд.

Ключевые слова: слабопроницаемый продуктивный горизонт, ПАВ, сульфанол, гидродинамический режим, интенсификация процесса подземного выщелачивания, слабообводненный рудный пласт.

Для цитирования: Аликулов Ш. Ш., Халимов И. У. Интенсификация параметров подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд на примере урановых месторождений Узбекистана // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3. – С. 37–48. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48.

Intensification of in situ uranium leaching from impermeable ore: A case-study of uranium deposits in Uzbekistan

Sh.Sh. Alikulov¹, I.U. Khalimov¹

¹ Navoi State Mining Institute, Navoiy, Uzbekistan, e-mail: sharofovich@mail.ru

Abstract: The article describes the research into intensification of in-situ leaching of uranium in complicated geological conditions. The research was performed in the uranium fields of Navoi Mining and Metallurgy Combinat. Permeability of the productive stratum was stimulated using surface active agents. For the first time ever, in the capacity of a SAS aimed to enhance uranium extractability from impermeable ore in in-situ leaching, sulfanolum was used. Modern in-situ leaching equipment enables improvement of the technology and its efficiency subject to natural conditions of any unique deposit with its specific features. Within the current economic situation, efficient technologies are the key factor to govern the economic expedience of mining. This article describes the main activities during all-inclusive selection of a geotechnology and estimates the early economic effect of various mining technologies. The impermeable and poorly watered uranium ore bodies operated by Navoi MMC were listed as uneconomic reserves for a long time as the conventional sulfuric acid treatment failed to provide efficient uranium production because of high agent consumption and intense clogging of pores. For these reasons, the research addresses at first the geological and technological peculiarities of uranium leaching from impermeable and poorly watered ore.

Key words: impermeable productive stratum, surface active agent, sulfanolum, hydrodynamic regime, in-situ leach intensification, poorly watered ore bed.

For citation: Alikulov Sh. Sh., Khalimov I. U. Intensification of in situ uranium leaching from impermeable ore: A case-study of uranium deposits in Uzbekistan. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3):37-48. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-37-48.

Введение

На сегодняшний день во всем мире год за годом усложняется процесс отработки глубоких залежей урановых руд методом подземного выщелачивания (ПВ), а также возникают проблемы добычи урана из слабопроницаемых руд. Одним из решений данной проблемы является разработка новой технологии, управление гидродинамическим режимом подачи раствора в песчаники и увеличение проницаемости пласта путем применения ПАВ. При отработке запасов слабопроницаемых и слабообводненных руд повышается концентрация металла в продуктивных растворах, снижается удельный расход серной кислоты, сокращается время отработки блоков и увеличивается минерально-сырьевая база [1 – 3].

Одним из направлений интенсификации процесса подземного выщелачивания урана является использование различных окислителей и добавление

ПАВ, выбор и практическое применение которых при способе ПВ урана имеет необходимость [4].

Настоящее исследование по разработке технологии добычи урановых руд со слабой проницаемостью рудоносного горизонта основывается на проведенных опытно-промышленных работах на месторождениях РУ-5 Навоийского горно-металлургического комбината (НГМК).

Описание эксперимента

На месторождении Лявлякен и Кетмончи НГМК проводились опытные работы по повышению производительности низкодебитных откачных скважин на действующих ячейках слабопроницаемых урановых руд с низким коэффициентом фильтрации — менее 0,5 м³/сут.

На опытной площади установлена буферная емкость для растворения реагента ПАВ (сульфанол) с пластовой водой. Сначала в соотношении 1:1 из

расчета концентрации, а затем дозируется в рабочий раствор с концентрацией 1,5 г/л. В емкость-смеситель подаются сернокислые растворы (с концентрацией по H_2SO_4 10 г/л) и расчетный объем раствора сульфанола (с концентрацией 1,5 г/л). Полученный выщелачивающий раствор нагнетается в закачные скважины опытной ячейки [5 – 7].

Исходные данные по опытной ячейке на месторождении Кетмончи следующие

Место испытаний: участок ПВ, урановые залежи, для получения более достоверного результата влияния ПАВ выбраны уже пробуренные ячейки.

Расстояние между закачными скважинами 30×30 м, в центре прямоугольника расположена откачная скважина, схема «прямолинейная» (состоящая из восьми закачных и двух откачных скважин).

Средние параметры ячейки: глубина скважины – 174 м, интервал фильтра – 162,0–170,0 м, статический уровень – 125 м, площадь – 1800 м², объем горнорудной массы – 16 200 м³, эффективная мощность – 9,0 м, коэффициент пористости – 0,20, поровой объем – 3240 м³, $CO_2 < 0,1\%$.

Средние параметры ячейки: глубина скважины – 176,0 м, интервал фильтра – 170,0–174,0 м, статический уровень – 125 м, площадь – 1800 м², объем горнорудной массы – 16 200 м³, эффективная мощность – 9,0 м, коэффициент пористости – 0,20, поровой объем – 3240 м³, $CO_2 < 0,1\%$.

Расчет порового объема одной ячейки:

$$V = S \cdot m \cdot 0,20 = 1800 \cdot 9,0 \cdot 0,20 = 3240 \text{ м}^3.$$

Суточный расход ПАВ составит: при ожидаемой суммарной приемистости восьми закачных скважин 8,0 м³/ч 8,0 м³/ч · 24 ч · 1,5 кг/м³ = 288 кг/сут.

Расчетное время подачи ПАВ на две ячейки составит:

$$2 \cdot 3240 \text{ м}^3 / (8,0 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 24 \text{ ч}) = 34 \text{ сут.}$$

Следовательно, расчетное количество сульфанола составит:

$$288 \text{ кг/сут} \cdot 34 \text{ сут} = 9792 \text{ сут.}$$

Исходные данные по опытной ячейке на месторождении Лявлякен следующие

Место испытаний: участок ПВ, урановые залежи. Для получения более достоверного результата влияния ПАВ выбраны уже пробуренные ячейки.

Ячейки № 2-3-2-2, 2-3-2-4: расстояние между закачными скважинами 30×30 м, в центре прямоугольника расположена откачная скважина, «гексагональная» (состоящая из девяти закачных и двух откачных скважин).

Средние параметры ячейки: глубина скважины – 104,1 м, интервал фильтра – 99,3–103,3 м, статический уровень – 2,0 м, площадь – 2520 м², объем горнорудной массы – 20 160 м³, эффективная мощность – 8,0 м, коэффициент пористости – 0,20, поровой объем – 4032 м³, $CO_2 < 0,1\%$.

Средние параметры ячейки: глубина скважины – 101,1 м, интервал фильтра – 96,9–100,7 м, статический уровень – 2,0 м, площадь – 2520 м², объем горнорудной массы – 20 160 м³, эффективная мощность – 8,0 м, коэффициент пористости – 0,20, поровой объем – 4032 м³, $CO_2 < 0,1\%$.

Расчет порового объема одной ячейки:

$$V = S \cdot m \cdot 0,20 = 2520 \cdot 8,0 \cdot 0,20 = 4032 \text{ м}^3.$$

Суточный расход ПАВ составит: при ожидаемой суммарной приемистости восьми закачных скважин 6,0 м³/ч 6,0 м³/ч · 24 ч · 1,5 кг/м³ = 216 кг/сут.

Расчетное время подачи ПАВ на две ячейки составит:

$$2 \cdot 4032 \text{ м}^3 / (6,0 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 24 \text{ ч}) = 56 \text{ сут.}$$

Таблица 1

Результаты изменения дебита откачных скважин на месторождении Лявлякан
Change in production rate of pumping wells in Lyavlyakan field

Время, сут	pH	Дебит без добавки ПАВ + H ₂ SO ₄ (10 г/л), м ³ /ч	Eh, мВ	Дебит с добавкой ПАВ (1,5 г/л) + H ₂ SO ₄ (10 г/л), м ³ /ч	Eh, мВ	pH
10	1,5	1	350	1,1	550	1,69
15	1,5	0,8	310	1,2	650	1,69
20	1,5	1	350	1,4	680	1,69
25	1,5	0,8	365	1,4	660	1,69
30	1,5	1	300	1,5	750	1,69
35	1,5	1	365	1,6	800	1,69
40	1,5	1	365	1,6	800	1,69

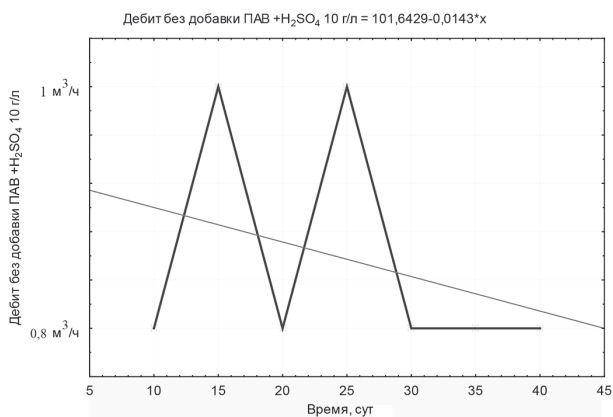


Рис. 1. График зависимости изменения дебита откачных скважин от продолжительности процесса выщелачивания без добавки сульфанола на месторождении Лявлякан

Fig. 1. Pumping well production versus leaching duration without addition of sulfanolum in Lyavlyakan

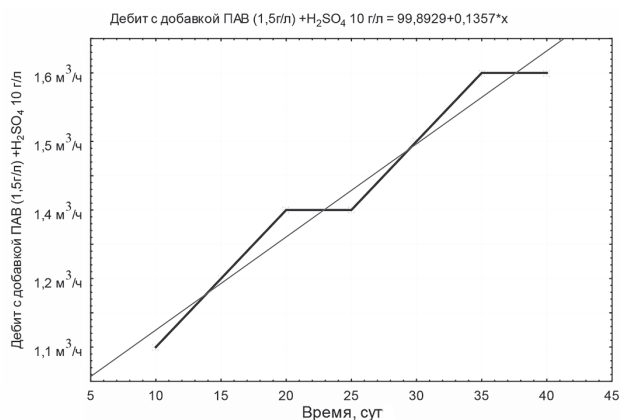


Рис. 2. График зависимости изменения дебита откачных скважин от продолжительности процесса выщелачивания с добавкой ПАВ (1,5 г/л) + H₂SO₄ на месторождении Лявлякан

Fig. 2. Pumping well production versus leaching duration with addition of SA agent (1.5 g/l)+H₂SO₄ in Lyavlyakan

Следовательно, расчетное количество сульфанола составит:

$$216 \text{ кг/сут} \cdot 56 \text{ сут} = 12\,096 \text{ сут.}$$

Итого общая потребность в ПАВ составит: $9792 + 12\,096 = 21\,888 \text{ кг}$.

Окисление рудного горизонта предусматривается по сернокислотной схеме. Реагент для проведения работ — ПАВ (сульфанол) — подавался вместе с серной кислотой концентрацией 8–10 г/л в закачные скважины. Изменения дебита откачных скважин приведены в табл. 1.

После подачи на одной из ячеек в закачные скважины растворов с добавкой ПАВ (1,5 г/л) и серной кислотой концентрации 10 г/л были получены положительные результаты, а именно концентрация ПАВ возросла до 2 г/л, концентрация урана — до 35 мг/л. Слабокислые растворы поданы на всю площадь участка. В результате наблюдался плавный продолжающийся рост концентрации урана до 61 мг/л. При соблюдении указанных выше концентраций поверхностно-активного вещества в рабочих растворах процесса кольматации не выявилось.

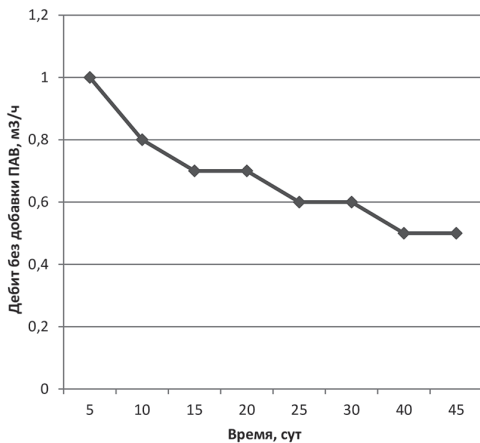


Рис. 3. График зависимости изменения дебита откачных скважин от продолжительности процесса выщелачивания без добавки ПАВ на месторождении Кетмончи

Fig. 3. Pumping well production versus leaching duration without addition of SA agent in Ketmonchi

Результаты контроля интенсивности обработки двух блоков месторождения Лявлякан без добавки сульфанола и ранее подвергнутых предварительному окислению представлены на рис. 1 и 2. Показатель извлечения по одному из них превысил с добавкой ПАВ 70%, по второму без добавки ПАВ составил 45%. В процессе проведения экспериментов было исследовано влияния ПАВ на скорость фильтрации и дебит откачных скважин. Выщелачивание урана на участках зон происходило в основном в диффузионном режиме, скорость выщелачивания которого не сравнима (на несколько порядков ниже) со скоростью фильтрации [8–9].

На урановых месторождениях Лявлякан и Кетмончи через 1,5 месяца после начала подачи выщелачивающего раствора ПАВ сульфанола в скважины наблюдалось увеличение дебита откачных скважин. Это вызывало резкое увеличение приемистости закачных скважин, и возникала необходимость каждый день замерять уровень скважины [10–13].

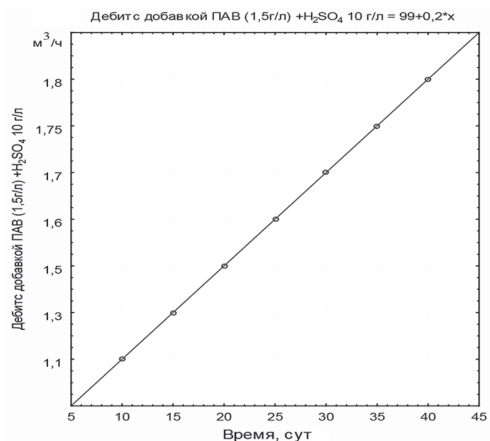


Рис. 4. График зависимости изменения дебита откачных скважин от продолжительности процесса выщелачивания с добавкой ПАВ (1,5 г/л) + H₂SO₄ на месторождении Кетмончи

Fig. 4. Pumping well production versus leaching duration with addition of SA agent (1.5 g/l)+H₂SO₄ in Ketmonchi

Таблица 2

Результаты изменения дебита откачных скважин на месторождении Кетмончи
Change in production rate of pumping wells in Ketmonchi field

Время, сут	рН	Дебит без добавки ПАВ + H ₂ SO ₄ (10 г/л), м ³ /ч	Eh, мВ	Дебитс добавкой ПАВ (1,5г/л) + H ₂ SO ₄ (10 г/л), м ³ /ч	Eh, мВ	рН
10	1,5	1	350	1,1	550	1,69
15	1,89	1	310	1,8	650	1,80
20	1,69	1	350	1,8	680	1,69
25	1,5	1	365	1,8	660	1,70
30	1,4	1	300	1,8	750	1,80
35	1,5	1	365	1,7	800	1,85
40	1,5	1	365	1,8	800	1,75

Работы по изменению дебита откачных скважин были продолжены на месторождении Кетмончи. Результаты исследований представлены на рис. 3, 4 и в табл. 2.

Преимущества применения поверхностно-активных веществ

В присутствии ПАВ повышается скорость выщелачивающих растворов, уменьшается расход серной кислоты в 1,6–1,7 раза, увеличивается извлечение урана на 10–12%, повышается содержание металла в продуктивном растворе. В процессе эксперимента контролировались дебиты откачных скважин в зависимости от величины рН (рис. 5, 6). Во время замеров из скважин отби-

рались пробы на содержание металла (табл. 3).

В процессе эксперимента велся учет количества закаченных и откаченных растворов. Чтобы не допускать перемешивания выщелачивающего раствора с подземными водами, производился контроль за балансом откачки и закачки (табл. 4).

На ячейке ПВ в качестве окислителя первоначально (в течение двух месяцев) применялся раствор с поверхностно-активным веществом концентрации 1,2 г/л, затем пластовая вода, насыщаемая эжекционным способом атмосферным воздухом (1 месяц). Таким образом, с начала месяца вода подкислялась серной кислотой до рН = 3 (~1,0 г/л

Таблица 3

Результаты опробования содержание металла участка ПВ Кетмончи и Лявлякан
Assaying data on metal content in in-situ leach sites in Ketmonchi and Lyavlyakan fields

№ п/п	Кетмончи			Лявлякан		
	рН	Ме, мг/л	ПАВ, г/л	рН	Ме, мг/л	ПАВ, г/л
1	1,69	25,0	1,5	1,69	35,0	1,5
2	1,69	41,0	1,5	1,60	31,0	1,5
3	1,69	21,0	1,5	1,60	31,0	1,5
4	1,69	58,0	1,5	1,60	68,0	1,5
5	1,69	32,0	1,5	1,60	42,0	1,5
6	1,69	32,0	1,5	1,60	42,0	1,5

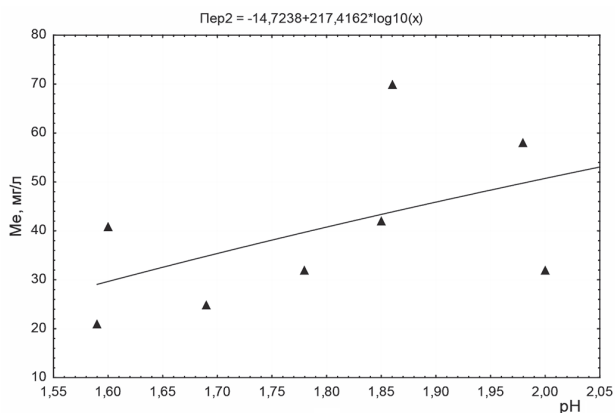


Рис. 5. Графики зависимости результатов опробования pH от содержания металла на месторождении Лявлякан

Fig. 5. Results of pH assay versus metal content in Lyavlyakan

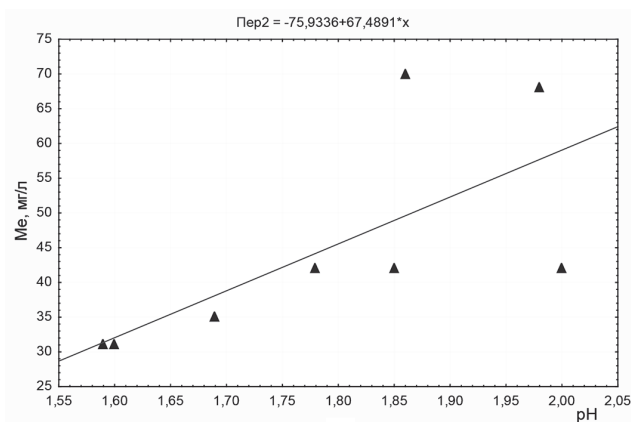


Рис. 6. Графики зависимости результатов опробования pH от содержания металла на месторождении Кетмончи

Fig. 6. Results of pH assay versus metal content in Ketmonchi

Таблица 4

Учет количества закаченных и откаченных растворов в скважинах

Amount of injected and pumped solutions

№ п/п	$V_n, \text{ м}^3$	$V_{\text{пав}}, \text{ т}$	$V_{\text{общ}}, \text{ м}^3$	$V, \text{ м}^3$ (откач.)
1	265	1,85	4119,2	9783
2	328	1,85	5042,2	12 441
3	578	1,85	9626,9	13 375
4	458,4	1,85	9065,2	
5	573	1,85	6932,1	
Σ	2202,4	9,27	34 785,6	35 599

Примечание: V_n — количество закаченной пластовой воды, м^3 ; $V_{\text{пав}}$ — количество закаченного ПАВ, т; $V_{\text{общ}}$ — общее количество закаченных растворов, м^3 .

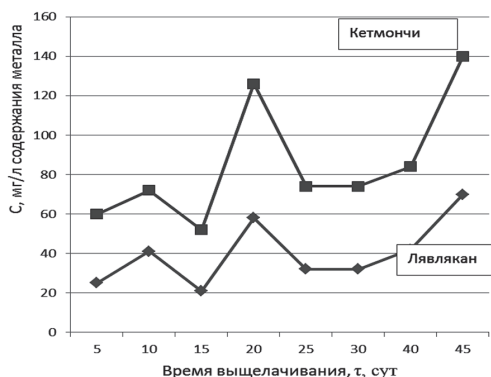


Рис. 7. График зависимости изменения содержания металла от времени выщелачивания τ из руд
Fig. 7. Change in metal content versus leaching duration

H_2SO_4). На ячейке ПВ пластовая вода насыщалась техническим кислородом и изредка (при отсутствии кислорода) — атмосферным воздухом. С начала месяца здесь также производилось подкисление воды до 1,0 г/л H_2SO_4 (pH≈3). На рис. 7 представлены графики зависимости показателей процесса выщелачивания по скважинам с начала эксплуатации опытного участка и изменения содержания металла от времени выщелачивания. Также была изучена зави-

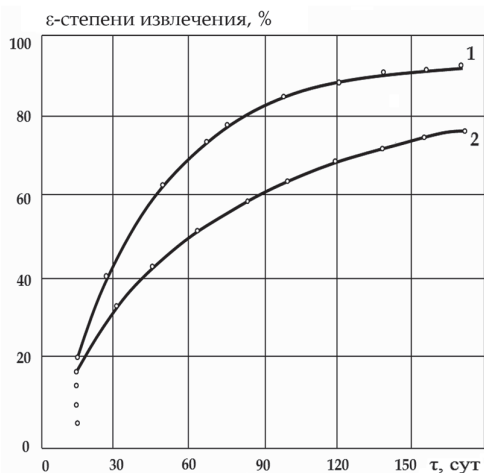


Рис. 8. График изменения степени извлечения урана от времени добычи: 1 — Кетмончи, 2 — Лявлякан
Fig. 8. Uranium recoverability versus production time: 1 — Ketmonchi; 2 — Lyavlyakan

симость степени извлечения урана от времени добычи (рис. 8). Анализ полученных графиков показал, что за весь период работы откачиваемые из скважин растворы имели pH на уровне 1,67.

В процессе отработки опытного блока происходило интенсивное выщелачивание урана из руд. Четко прослежена взаимосвязь между равновесной концентрацией сульфанола в растворах и продуктивной концентрацией металла. Так, анализ графических данных показал, что при равновесной концентрации сульфанола в растворе 1,5 г/л концентрация Me составляла 20–25 мг/л, а при концентрации сульфанола 2,5 г/л она повышается до 50–60 мг/л.

Таким образом, введение в процесс выщелачивания ПАВ привело к интенсификации процесса выщелачивания урановых руд и окисления в кратчайшее время продуктивного пласта.

Следовательно использование ПАВ только с серноокислыми растворами менее эффективно, чем предварительное окисление рудного горизонта выщелачивавшим раствором. Опытным путем установлено, что концентрация ПАВ для увеличения проницаемости горных пород обеспечивается повышением дебита откачных скважин.

Опытные работы по применению ПАВ продолжены на урановых месторождениях Лявлякан. В соответствии с утвержденной программой для альтернативного выбора дальнейшей технологии опытные работы проводились по трем направлениям: применение в качестве комплексообразователя бикарбоната аммония с эжектированием атмосферного воздуха; применение бикарбоната аммония и сульфанола с эжектированием атмосферного воздуха; окисление техническим кислородом через специальный эжектор.

Как видно из рис. 9, в начале откачки из опытной скважины наблюдается

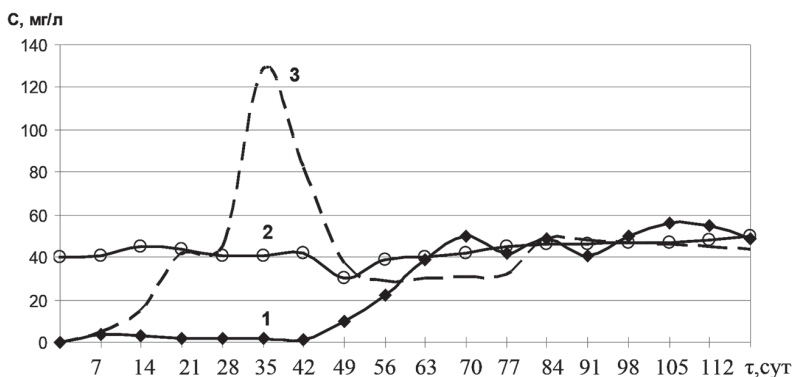


Рис. 9. График изменения концентрации Me в растворах на месторождении Кетмончи в зависимости от времени: 1 – скважина (кислород воздуха + H_2SO_4 , активный режим); 2 – скважина 2-9-14 (сернокислотное, H_2SO_4 (10–15 г/л)); 3 – скважина 2-9-32 (H_2SO_4 + сульфанол)

Fig. 9. Change in Me concentration in Ketmonchi solutions versus time: 1 – well (atmospheric oxygen + H_2SO_4 , active regime); 2 – well 2-9-14 (sulfuric acid treatment, H_2SO_4 (10–15 g/l)); 3 – well 2-9-32 (H_2SO_4 + sulfanolum)

незначительный рост металла (кислород воздуха + H_2SO_4 , активный режим). Начальная концентрация металла составила 10 мг/л при производительности насоса в среднем $\sim 1,5$ м³/ч. Затем концентрация металла достигла 45–55 мг/л (через 35 сут).

По опытной скважине наблюдался заметный рост (сернокислотное, H_2SO_4 (10–15 г/л)) концентрации металла, который стабилизировался на уровне 40–45 мг/л. Работы были продолжены (H_2SO_4 + сульфанол) до появления в откачных скважинах продуктивного раствора; по опытной скважине наблюдался значительный рост металла, максимальная концентрация металла составила 130 мг/л.

Экспериментальные работы, результаты которых представлены в табл. 5, проводились на низко дебитных геотехнологических скважинах. Полупромышленные испытания включали подачу специально подобранных химических реагентов с нагнетанием выщелачивающих растворов в продуктивный пласт до достижения расчетного радиуса растекания растворов от фильтра скважин.

Интенсивность обработки вскрытых запасов эксплуатационных блоков зави-

сит от производительности добычных скважин (рис. 10) по продуктивному пласту и содержания урана в растворе с учетом коэффициента использования скважин. В связи с этим для уточнения данных и определения изменения геотехнологических параметров скважин во время проведения экспериментальных работ производился замер дебита скважин.

Таблица 5

Геотехнологические параметры скважины после экспериментов на месторождении Лявлякан
Technological parameters of well after experimentation in Lyavlyakan field

Время, сут	Q, м ³ /ч	U, мг/л
45	5	50
40	4,5	45
35	4,2	40
30	4	35
28	3,8	30
23	3,3	25
20	3	20
18	2,5	15
15	2	10
10	1	5

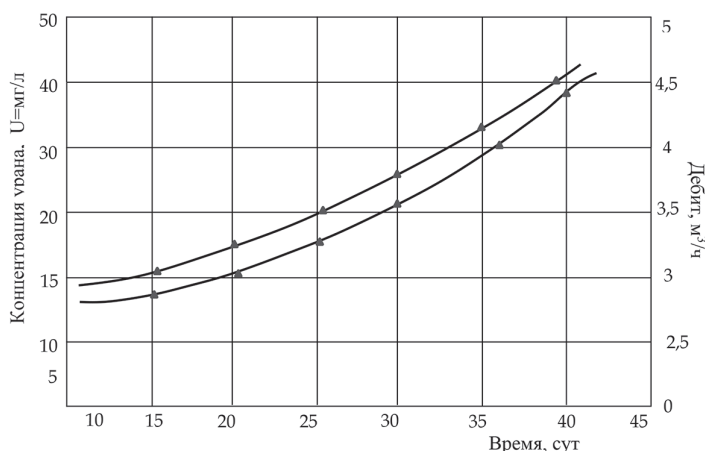


Рис. 10. Динамика изменения содержания урана и дебита скважины от времени эксплуатации
 Fig. 10. Dynamics of uranium content and well production rate versus operation time

После подачи необходимого количества химических реагентов и выщелачивающих растворов на добычных полигонах через насосы и нагнетательные скважины подавали выщелачивающий раствор под давлением. Подбор химических реагентов осуществлялся по характеристикам в соответствии с поставленной задачей.

В результате проведения экспериментальных работ было установлено, что подобранные химические реагенты положительно влияют на процессы выщелачивания урана.

Выводы

Исследованиями выявлены закономерности изменения коэффициента фильтрации из глинистых горных пород при использовании ПАВ сульфанола, при котором обеспечивается полнота формирования продуктивных растворов.

Впервые на основе исследований разработана новая эффективная технология отработки гидрогенных месторождений урана со слабой проницаемостью рудоносного горизонта с использованием сульфанола в качестве поверхностно-активного вещества при подземном выщелачивании урановых руд.

Заключение

На основе проведенных исследований в данной статье получены следующие результаты:

1. В результате теоретических исследований перетекания растворов по рудному пласту при ПВ урана из слабопроницаемых руд установлено, что изменение физико-химических характеристик оказывает влияние на скорость фильтрации выщелачивающих растворов и продолжительность продвижения зоны выщелачивания к откачным скважинам. Режим фильтрации глинистых горных пород зависит от величины градиента напора, при этом в области больших градиентов напора (свыше 100 – 150 м) отмечается линейный закон фильтрации. Независимость коэффициента проницаемости от величины градиента проницаемости глинистых горных пород не является постоянной величиной, и он может изменяться в зависимости от гидрогеохимических и термодинамических условий.

2. Проведенные исследования показали, что применение при ПВ урана сульфанола значительно интенсифицирует скорость и глубину проникновения выщелачивающих растворов в глини-

стых плохо проницаемых рудах и увеличивает коэффициент фильтрации. Исследованиями выявлены закономерности изменения коэффициента фильтрации из глинистых горных пород при использовании сульфанола, который обеспечивает полноту формирования продуктивных растворов.

3. Впервые на основе исследований разработана новая эффективная техно-

логия отработки гидрогенных месторождений урана со слабой проницаемостью рудоносного горизонта с использованием сульфанола при ПВ урановых руд. При увеличении скорости фильтрации растворов в 1,5 раза и уменьшении до минимума кольматационных явлений достигается максимальное извлечение металла на уровне 80% и увеличение степени отработки запасов от 12 – 16 до 22 – 25%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аликулов Ш. Ш., Нажимов Ф. Ф. Анализ базовой модели подземного выщелачивания урана к природным условиям месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 1. – С. 98 – 104.

2. Аликулов Ш. Ш. Интенсификация технологических процессов подземного выщелачивания урана из слабопроницаемых руд // Известия вузов. Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 78 – 81.

3. Аликулов Ш. Ш., Курбанов М. А., Шарафутдинов У. З., Халимов И. У. Исследование гидродинамических параметров при подземном выщелачивании путем физического моделирования // Горный вестник Узбекистана. – 2019. – № 1. – С. 77 – 82.

4. Lü Y., Lü J., Zhou J., Shen J. Surfactant study on promoting leaching rate of uranium // Chinese Journal of Rare Metals. 2016. Vol. 40. No 2. Pp. 182 – 187.

5. Сапаров А. Б., Шарафутдинов У. З., Ахадов Х. Р. Оценка влияния водоупоров на основные геотехнологические показатели отработки // Горный вестник Узбекистана. – 2015. – № 3. – С. 11 – 15.

6. Кеслер А. Г., Носков М. Д., Истомин А. Д., Носкова С. Н. Комплексная физико-химическая модель сернокислотного выщелачивания урана из песчано-глинистых пород инфльтрационных месторождений // Вестник Российской академии естественных наук. – 2013. – № 7. – С. 41 – 47.

7. Kaixuan Tan, Chunguang Li, Jiang Liu, Huiqiong Qu A novel method using a complex surfactant for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 150. Pp. 99 – 106. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.10.001.

8. Kuhar L. L., Bunney K., Jackson M., Oram J., Rao A. Assessment of amenability of sandstone-hosted uranium deposit for in-situ recovery // Hydrometallurgy. 2018. Vol. 179. Pp. 157 – 166.

9. Hoummady E., Golfier F., Cathelineau M., Neto J., Lefevre E. A study of uranium-ore agglomeration parameters and their implications during heap leaching // Minerals Engineering. 2018. Vol. 127. Pp. 22 – 31.

10. Голик В. И., Заалишвили В. Б., Разоренов Ю. И. Опыт добычи урана выщелачиванием // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 4. – С. 11–18.

11. Аренс В. Ж. Физико-химическая геотехнология. – М., 2010.

12. Ляшенко В. И., Андреев Б. Н., Куча П. М. Развитие горнотехнических технологий подземного блочного выщелачивания металлов из скальных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 4. – С. 11–18.

13. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Ляшенко В. И. Особенности конструирования систем подземного выщелачивания металлов // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – Т. 19. – № 1. – С. 80 – 91. **PLAZ**

REFERENCES

1. Alikulov Sh. Sh., Nazhimov F. F. Analysis of the reference in-situ uranium leaching model with regard to natural conditions of a deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 1, pp. 98–104. [In Russ].
2. Alikulov Sh. Sh. Intensification of in-situ uranium leaching processes in impermeable ore. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal.* 2017, no 1, pp. 78–81. [In Russ].
3. Alikulov Sh. Sh., Kurbanov M. A., Sharafutdinov U. Z., Khalimov I. U. Study of hydrodynamic parameters in in-situ leach by physical simulation. *Gorniy vestnik Uzbekistana.* 2019, no 1, pp. 77–82. [In Russ].
4. Lü Y., Lü J., Zhou J., Shen J. Surfactant study on promoting leaching rate of uranium. *Chinese Journal of Rare Metals.* 2016. Vol. 40. No 2. Pp. 182–187.
5. Saparov A. B., Sharafutdinov U. Z., Akhadov Kh. R. Influence of confining beds on production performance. *Gorniy vestnik Uzbekistana.* 2015, no 3, pp. 11–15. [In Russ].
6. Kesler A. G., Noskov M. D., Istomin A. D., Noskova S. N. Integrated physicochemical model of sulfuric acid uranium leach from sand-and-clay rocks of infiltration reservoirs. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk.* 2013, no 7, pp. 41–47. [In Russ].
7. Kaixuan Tan, Chunguang Li, Jiang Liu, Huiqiong Qu A novel method using a complex surfactant for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits. *Hydrometallurgy.* 2014. Vol. 150. Pp. 99–106. DOI: 10.1016/j.hydromet.2014.10.001.
8. Kuhar L. L., Bunney K., Jackson M., Oram J., Rao A. Assessment of amenability of sandstone-hosted uranium deposit for in-situ recovery. *Hydrometallurgy.* 2018. Vol. 179. Pp. 157–166.
9. Hoummady E., Gouffier F., Cathelineau M., Neto J., Lefevre E. A study of uranium-ore agglomeration parameters and their implications during heap leaching. *Minerals Engineering.* 2018. Vol. 127. Pp. 22–31.
10. Golik V. I., Zaalishvili V. B., Razorenov Yu. I. Experience of uranium production by leaching. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no 4, pp. 11–18. [In Russ].
11. Arens V. Zh. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya* [Physicochemical geotechnology], Moscow, 2010.
12. Lyashenko V. I., Andreev B. N., Kucha P. M. Technologies for in-situ block leaching of metals from hard rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 4, pp. 11–18. [In Russ].
13. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Lyashenko V. I. Structural peculiarities of in-situ metal leach systems. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Studies.* 2018, vol. 19, no 1, pp. 80–91. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аликулов Шухрат Шарофович¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: sharofovich@mail.ru,

Халимов Илхом Убайдуллаевич¹ — канд. техн. наук, доцент,
зав. кафедрой, e-mail: halimov_i@bk.ru,

¹ Навоийский государственный горный институт, Навои, Узбекистан.

Для контактов: Аликулов Ш.Ш., e-mail: sharofovich@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sh.Sh. Alikulov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: sharofovich@mail.ru,

I.U. Khalimov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Head of Chair, e-mail: halimov_i@bk.ru,

¹ Navoi State Mining Institute, 210100, Navoiy, Uzbekistan.

Corresponding author: Sh.Sh. Alikulov, e-mail: sharofovich@mail.ru.

Получена редакцией 24.04.2019; получена после рецензии 16.10.2020; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 24.04.2019; received after the review 16.10.2020; accepted for printing 10.02.2021.