Статья поступила в редакцию: 26.09.2026
Статья принята к публикации: 02.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.775:661.185

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23500

Нейтрализация сероводорода в продуктивных растворах при подземном выщелачивании урана: теоретическое и лабораторное исследование

Шаропов Кодиржон Рашид угли
ассистент кафедра техники и технологии добычи и переработки руд редких и радиоактивных металлов
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: qodirjonrashdovich@gmail.com

Халимов Илхом Убайдуллоевич
д-р техн. наук, проф.
кафедра техники и технологии добычи и переработки руд редких и радиоактивных металлов, Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: halimov_i@bk.ru

Neutralization of hydrogen sulfide in pregnant solutions during in-situ uranium leaching: theoretical and laboratory studies

Sharopov Qodirjon Rashid o'g'li
Assistant
Department of Mining and Processing Technology of Ores of Rare and Radioactive Metals, Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoiy

Khalimov Ilkhom Ubaydulloyevich
doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Mining and Processing Technology of Ores of Rare and Radioactive Metals, Navoi State University of Mining and Technologies
Uzbekistan, Navoiy

Аннотация

Целью настоящего исследования является разработка теоретических основ нейтрализации сероводорода (H_2S) в продуктивных растворах, образующихся при подземном выщелачивании урана, с использованием пероксида водорода (H_2O_2), и оценка данного подхода в лабораторных условиях. Экспериментальные исследования охватывали диапазон

Библиографическое описание: Шаропов К.Р.У., Халимов И.У. Нейтрализация сероводорода в продуктивных растворах при подземном выщелачивании урана: теоретическое и лабораторное исследование // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23500

стехиометрических соотношений H_2S:H_2O_2 от 1:0,5 до 1:2, что позволило установить зависимость степени нейтрализации сероводорода от дозы окислителя. В исследовании проанализировано влияние окислительно-восстановительного потенциала (Eh), системы Fe^{3+}/ Fe^{2+} и сульфидных минералов на образование и устойчивость H_2S. Предложен трёхстадийный механизм действия H_2O_2: непосредственное окисление H_2S и сульфид-ионов, окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} и окисление U(IV) до U(VI). Лабораторные исследования выполнены на продуктивных растворах государственного предприятия «Навоийуран».

В результате применения H_2O_2 концентрация H_2S в продуктивном растворе снизилась с 160,3 мг/л до 0 мг/л, значение Eh повысилось со 100 до 500 мВ, а pH снизился с 6,9 до 6,3. В результате H_2S был полностью нейтрализован, а окислительное состояние раствора усилилось. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических регламентов управления химическим составом продуктивных растворов на предприятиях, эксплуатирующих сульфидсодержащие урановые месторождения методом подземного выщелачивания.

Abstract

The aim of this study is to develop the theoretical basis for the neutralization of hydrogen sulfide (H_2S) in pregnant solutions generated during in-situ uranium leaching using hydrogen peroxide (H_2O_2), and to evaluate this approach under laboratory conditions. The experiments covered a range of stoichiometric H_2S:H_2O_2 ratios from 1:0.5 to 1:2, which made it possible to establish the relationship between the degree of hydrogen sulfide neutralization and the oxidant dose. The study analyzed the effects of redox potential (Eh), the Fe^{3+}/Fe^{2+} system, and sulfide minerals on the formation and stability of H_2S. A three-stage mechanism of H_2O_2 action was proposed: direct oxidation of H_2S and sulfide ions, oxidation of Fe^{2+} to Fe^{3+}, and oxidation of U(IV) to U(VI). Laboratory studies were conducted using pregnant solutions from the State Enterprise Navoiyuran. As a result of H_2O_2 treatment, the H_2S concentration in the pregnant solution decreased from 160.3 mg/L to 0 mg/L, while the Eh value increased from 100 to 500 mV and the pH decreased from 6.9 to 6.3. Consequently, H_2S was completely neutralized, and the oxidizing state of the solution was enhanced. The results obtained can be used in developing process regulations for managing the chemical composition of pregnant solutions at enterprises operating sulfide-bearing uranium deposits by in-situ leaching.

Ключевые слова: подземное выщелачивание урана, продуктивный раствор, сероводород, пероксид водорода, окислительно-восстановительный потенциал, пирит, нейтрализация.

Keywords: in-situ uranium leaching, pregnant solution, hydrogen sulfide, hydrogen peroxide, redox potential, pyrite, neutralization.

Финансирование: Исследование выполнено на базе Навоийского государственного горно-технологического университета в рамках хозяйственного договора № 3 – 2024 от 8 августа 2024 года, заключённого с государственным предприятием «Навоийуран», по теме «Разработка технологии извлечения урана из месторождений со сложными горно-геологическими условиями».

Funding: The research was conducted at Navoi State University of Mining and Technologies within the framework of Economic Contract No. 3 – 2024 dated August 8, 2024, concluded with the State Enterprise «Navoiyuran», on the topic «Development of a technology for uranium extraction from deposits with complex mining and geological conditions.»

Введение

Подземное выщелачивание урана (ПВ) представляет собой геотехнологический способ, основанный на переводе минералов урана в раствор непосредственно в недрах с использованием выщелачивающего раствора и последующем извлечении образующегося продуктивного раствора на поверхность через систему скважин. Современные исследования показывают, что эффективность данного процесса зависит не только от состава выщелачивающего раствора, но и от минералогического состава руды, гидродинамических условий, процессов массообмена и окислительно-восстановительных реакций [2–6, 9].

В системах, содержащих сульфидные минералы, особенно пирит (FeS_2), изменение окислительно-восстановительного равновесия оказывает влияние на химическое состояние продуктивного раствора. Окисление пирита может приводить к увеличению расхода окислителя, изменению соотношения Fe^{2+} и Fe^{3+} и, тем самым, влиять на условия перехода урана в раствор [2, 3, 6, 9, 1]. В водной среде H_2S существует в равновесии между формами H_2S, HS^- и S^{2-}, соотношение которых зависит от значения pH. Современные исследования по окислению H_2S с использованием H_2O_2 показывают, что продукты окисления и расход реагента зависят от значений pH, Eh и концентрации сульфидов в растворе [7, 10–12]. В производственных условиях государственного предприятия «Навоийуран» управление физико-химическим состоянием продуктивных растворов, в частности снижение негативного влияния сульфидных компонентов, имеет важное практическое значение [8].

Целью исследования является определение эффективности снижения концентрации H_2S при различных дозах H_2O_2 в продуктивном растворе, обоснование теоретического механизма нейтрализации H_2S, а также оценка изменений показателей pH, Eh и концентрации урана.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были выбраны продуктивные растворы, отобранные на 2-м геотехнологическом руднике Зафарабадского рудоуправления государственного предприятия «Навоийуран». Полевые пробы были отобраны из откачных скважин МСК-6 и МСК-13. Учитывая возможность улетучивания H_2S в газовую фазу после отбора пробы, анализу H_2S уделялось приоритетное внимание. Концентрация урана определялась

титриметрическим методом в соответствии с требованиями O'zDSt 0281:2006. Содержание H_2S определялось в лаборатории методом йодометрического титрования; значения pH и Eh фиксировались до и после эксперимента.

Лабораторный эксперимент проводился на 500 мл продуктивного раствора. В коническую колбу заливали 500 мл раствора, после чего вводили дозы 60 %-ного H_2O_2, соответствующие стехиометрическим соотношениям H_2S:H_2O_2 = 1:0,5; 1:1; 1:1,5 и 1:2. После добавления реагента колбу закрывали резиновой пробкой и перемешивали на магнитной мешалке DLAB MS7-H550-S со скоростью 500 об/мин в течение 1 минуты.

Степень снижения концентрации H_2S рассчитывалась по формуле:

$$\eta = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100\ \% \quad (1)$$

где C_0 — концентрация H_2S до эксперимента, мг/л; C_1 — концентрация H_2S после эксперимента, мг/л. Для значения ≤5 мг/л степень снижения рассчитывалась как минимальная оценочная величина.

Результаты и обсуждения

Теоретические основы образования H_2S

Согласно теоретическому анализу, образование и накопление H_2S в продуктивном горизонте связано с усилением восстановительных условий среды. Снижение значения Eh повышает устойчивость Fe^{2+} и восстановленных форм серы. В результате может усиливаться образование H_2S, создаются условия для восстановления U(VI) до U(IV) и повторного осаждения урана.

Научная идея предлагаемого подхода заключается в управлении окислительно-восстановительным состоянием продуктивного раствора с помощью H_2O_2. H_2O_2 одновременно окисляет присутствующий H_2S и переводит Fe^{2+} в Fe^{3+}, тем самым способствуя повышению значения Eh системы. Это ограничивает формирование благоприятной восстановительной среды для повторного образования H_2S.

Трёхстадийный механизм действия H_2O_2

На основе термодинамических расчётов и данных литературы действие H_2O_2 в системе «сульфидный минерал — H_2S — уран» объясняется тремя взаимосвязанными стадиями.

Стадия 1 — непосредственное окисление сероводорода и сульфид-ионов. На начальном этапе H_2S реагирует с H_2O_2 с образованием элементарной серы:

$$H_2S + H_2O_2 \rightarrow S^0\downarrow + 2H_2O \quad (2)$$

При достаточном количестве H_2O_2 более глубокое окисление сульфидных форм может приводить к образованию сульфата:

$$HS^- + 4H_2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 4H_2O + H^+ \quad (3)$$

$$S^{2-} + 4H_2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + 4H_2O \quad (4)$$

Стадия 2 — окисление двухвалентного железа. H_2O_2 окисляет Fe^{2+} до Fe^{3+}:

$$2Fe^{2+} + H_2O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + 2H_2O \quad (5)$$

Образовавшийся Fe^{3+} окисляет U(IV) до U(VI), вновь переходя в Fe^{2+}:

$$UO_2 + 2Fe^{3+} \rightarrow UO_2^{2+} + 2Fe^{2+} \quad (6)$$

Повторно образовавшийся Fe^{2+} может вновь окисляться под действием H_2O_2 до Fe^{3+}. Таким образом формируется окислительно-восстановительный цикл в системе Fe^{3+}/Fe^{2+}.

Стадия 3 — непосредственное окисление четырёхвалентного урана. H_2O_2 в кислой среде может также выступать в качестве прямого окислителя при переводе U(IV) в состояние U(VI):

$$U^{4+} + H_2O_2 \rightarrow UO_2^{2+} + 2H^+ \quad (7)$$

$$UO_2 + H_2O_2 + 2H^+ \rightarrow UO_2^{2+} + 2H_2O \quad (8)$$

Таким образом, трёхстадийный механизм действия H_2O_2 одновременно охватывает три технологические функции: снижение концентрации H_2S, ограничение усиления восстановительной среды и содействие сохранению урана в растворе в окисленном состоянии. Однако полученные лабораторные результаты самостоятельно не доказывают повышение степени извлечения урана; для подтверждения данного вывода требуются специальные кинетические и балансовые эксперименты.

Результаты лабораторных исследований

Таблица 1. Результаты обработки 60 %-ным раствором H_2O_2

Реагент	Соотношение	H2O2 60% (мг)	V (мл)	До реакции				После реакции			
				pH	H2S (мг/л)	U (мг/л)	Eh (мВ)	pH	H2S (мг/л)	U (мг/л)	Eh (мВ)
H2O2	1:0,5	66,79	500	6,9	160,3	41	100	6,7	50	41	200
H2O2	1:1	133,58	500	6,9	160,3	41	100	6,6	20	41	300
H2O2	1:1,5	200,38	500	6,9	160,3	41	100	6,4	≤ 5	41	400
H2O2	1:2	267,17	500	6,9	160,3	41	100	6,3	0	41	500

С увеличением дозы H_2O_2 концентрация H_2S снижалась со 160,3 мг/л до 50; 20; ≤5 и 0 мг/л соответственно, что составило 68,8; 87,5; не менее 96,9 и 100 % снижения. При этом значение Eh возрастало со 100 до 200; 300; 400 и 500 мВ, а pH снижался с 6,9 до 6,7; 6,6; 6,4 и 6,3. Данные результаты свидетельствуют об усилении окислительных свойств раствора вследствие добавления H_2O_2.

В данной серии экспериментов концентрация урана оставалась на уровне 41 мг/л. Поэтому повышение степени извлечения урана под действием H_2O_2 в рамках настоящего эксперимента не может считаться доказанным. Полученные результаты подтверждают выводы о снижении концентрации H_2S и повышении Eh.

При соотношении H_2S:H_2O_2 = 1:2 было зафиксировано отсутствие аналитически определяемого H_2S. Однако данное значение относится исключительно к рассмотренным лабораторным условиям, и прежде чем принимать его в качестве окончательной оптимальной дозы для промышленного применения, необходимо провести повторные эксперименты с различными исходными концентрациями H_2S и расходом реагента.

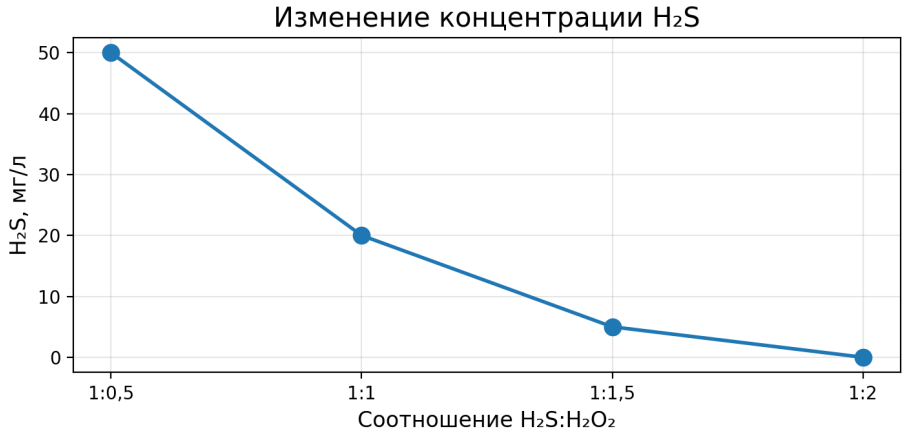


Рисунок 1. Изменение концентрации H_2S

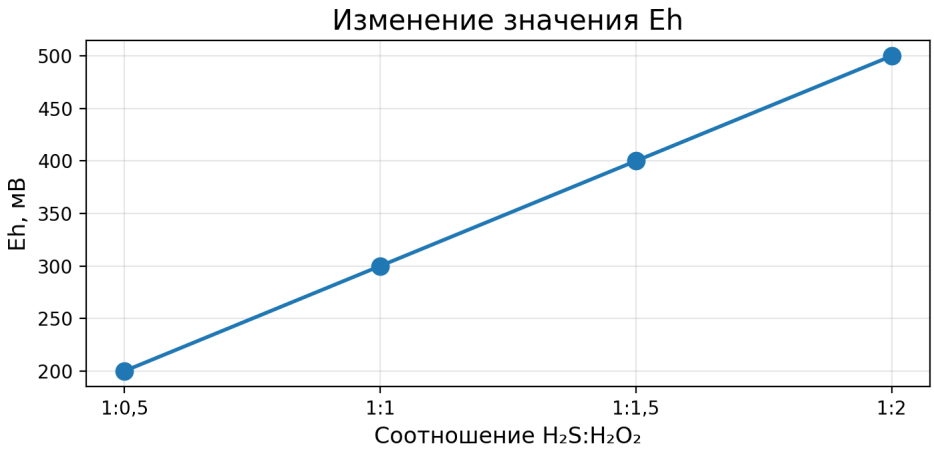


Рисунок 2. Изменение значения Eh

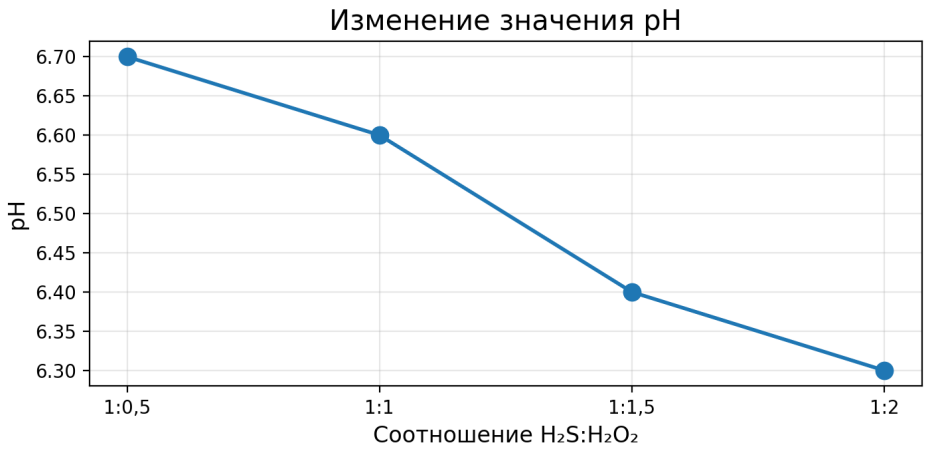


Рисунок 3. Изменение значения pH

Заключение

1. В продуктивных растворах, отобранных на 2-м геотехнологическом руднике Зафарабадского рудоуправления, содержание H_2S по исследованным скважинам варьировало в диапазоне 0–160,3 мг/л, при этом максимальное значение зафиксировано на скважине 45-7-26.

2. В результате применения доз 60 %-ного H_2O_2 в диапазоне 66,79–267,17 мг на 500 мл продуктивного раствора концентрация H_2S снизилась со 160,3 мг/л до 50; 20; ≤5 и 0 мг/л. Степень снижения H_2S составила соответственно 68,8; 87,5; не менее 96,9 и 100 %.

3. Снижение концентрации H_2S сопровождалось повышением Eh со 100 до 500 мВ и понижением pH с 6,9 до 6,3, что свидетельствует об усилении окислительных свойств раствора вследствие добавления H_2O_2.

4. Теоретически действие H_2O_2 объясняется тремя стадиями: окисление H_2S и сульфид-ионов; окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} с формированием цикла Fe^{3+}/Fe^{2+}; окисление U(IV) до U(VI). Результаты лабораторных исследований по снижению H_2S и повышению Eh согласуются с данным механизмом, однако количественный вклад каждой отдельной стадии пока не определён.

5. При соотношении H_2S:H_2O_2 = 1:2 наблюдалось отсутствие аналитически определяемого H_2S. Данное значение получено в лабораторных условиях и не должно рассматриваться в качестве окончательной оптимальной дозы для промышленного применения. Для установления технологического режима необходимы повторные лабораторные и опытно-промышленные испытания.

Список литературы

1. Eglizaud N., Miserque F., Simoni E., Schlegel M., Descostes M. Uranium(VI) interaction with pyrite (FeS_2): Chemical and spectroscopic studies // Radiochimica Acta. – 2006. – T. 94, № 9–11. – P. 651–656. – DOI: 10.1524/ract.2006.94.9–11.651.

2. Fan Y., Song H., Wang Z., Gan N., Zhang C., Zhao B., Xu Z., Tan Y. The behavior of pyrite during in-situ leaching of uranium by CO_2 + O_2 // Ore Geology Reviews. – 2024. – T. 169. – Art. 106085. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106085.
3. Kurmanseiit M.B., Tungatarova M.S., Royer J.-J., Aizhulov D.Y. et al. Streamline-based reactive transport modeling of uranium mining during in-situ leaching // Hydrometallurgy. – 2023. – T. 220. – Art. 106107. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106107.
4. Li G., Yao J. A Review of In Situ Leaching (ISL) for Uranium Mining // Mining. – 2024. – T. 4, № 1. – P. 120–148. – DOI: 10.3390/mining4010009.
5. Qiao P., Xiong S., Ge L., Song H., Yu H., Yang Y., Wang R., Kang S., Zhou Y., Fan Y. The influence of mineralogical characteristics and pH on uranium extraction via in-situ leaching: Preliminary case analysis of the Hadatu uranium deposit, China // Hydrometallurgy. – 2025. – T. 235. – Art. 106492. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2025.106492.
6. Qiu W., Yang Y., Song J., Que W.-L., Liu Z., Weng H., Wu J., Wu J. What chemical reaction dominates the CO_2 and O_2 in-situ uranium leaching? // Applied Geochemistry. – 2023. – T. 148. – Art. 105522. – DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105522.
7. Schovan S. et al. Remediation of Sulfides in Produced Waters of the Oil and Gas Industry Using Hydrogen Peroxide // Water. – 1987. – T. 16, № 14. – Art. 1987. – DOI: 10.3390/w16141987.
8. State Enterprise Navoiyuran. Structural divisions: Zafarabad Mining Administration [Electronic resource]. URL: https://navoiyuran.uz/uz/biznes-birliklari/ (дата обращения: 18.09.2026).
9. Wang B., Luo Y., Liu J. h., Li X., Zheng Z.-h., Chen Q.-q., Li L.-y., Wu H., Fan Q.-r. Ion migration in in-situ leaching of uranium: Field trial and reactive transport modelling // Journal of Hydrology. – 2022. – T. 615. – Art. 128634. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128634.
10. Wulansari I., Sediawan W.B., Hidayat M. The Oxidation of Sulphide Compounds in the Order of Processing Sodium Hydrosulphides // Waste Technology. – 2023. – T. 11, № 1. – P. 42–51. – DOI: 10.14710/11.1.42–51.
11. Zhang C. et al. Electrochemical valorization of H_2S in natural gas to sulfate under mild conditions // Nature Communications. – 2025. – T. 16. – Art. 7175. – DOI: 10.1038/s41467-025-62445-y.
12. Zhou J., Li X. Removal of Gaseous H_2S by the Titanium Silicalite-1/H_2O_2 Wet Oxidation System // Energy & Fuels. – 2023. – T. 37, № 2. – P. 1169–1179. – DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03067.