Статья поступила в редакцию: 24.09.2026
Статья принята к публикации: 30.09.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 628.54:669

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23489

Кислые стоки гидрометаллургических производств: образование, химизм и нейтрализация

Шарипов Санъат Шухрат угли
д-р. техн. наук, доц.
кафедры Химическая технология, Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои
E-mail: element_2993@mail.ru

Юлдошева Муниса Баходир кизи
базовый докторант
Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Азимова Дилафруз Бурхон кизи
ученик-стажёр, Навоийский государственный горно-технологический университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Acidic wastewater of hydrometallurgical production: formation, chemistry and neutralization

Sharipov Sanat
Head of the Department of Chemical Technology, PhD
Associate Professor, Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Yuldosheva Munisa Bakhodir kizi
Basic doctoral student
Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Azimova Dilafruz Burkhon kizi
Research Intern, Navoi State University of Mining and Technologies
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы образования, химического состава и нейтрализации кислых сточных вод, образующихся в процессе бактериального окисления сульфидных золотосодержащих концентратов. Объектом исследования являлся верхний перелив

Библиографическое описание: Шарипов С.Ш.У., Юлдошева М.Б. кизи, Азимова Д.Б. кизи Кислые стоки гидрометаллургических производств: образование, химизм и нейтрализация // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23489

противоточного декантатора ПТД-1 участка бактериального окисления Гидрометаллургического завода №3. Исследуемый раствор характеризовался высокой кислотностью (pH 1,2) и плотностью 1,032 г/см³. Масс-спектрометрический анализ показал многокомпонентный химический состав раствора, включающий железо, медь, мышьяк, никель, кобальт, марганец, магний, кальций, калий, натрий, свинец, сурьму, серебро и другие элементы. Среди определяемых металлических компонентов наибольшая концентрация наблюдалась для железа и составляла 13,7 г/л. Концентрация сульфатов достигала 43,0 г/л, мышьяка — 1,87 г/л, меди — 327,4 мг/л.

Проведена экспериментальная нейтрализация кислого стока с использованием $CaCO_3$, CaO и NaOH. Установлено повышение pH исходного раствора до 6,20; 7,40 и 6,46 соответственно. Рентгенофазовый анализ образующегося твёрдого материала подтвердил наличие гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и других минеральных фаз. Полученные результаты показывают необходимость учитывать при выборе нейтрализующего реагента не только достигаемое значение pH, но и фазовый состав образующегося осадка.

Abstract

The paper considers the formation, chemical composition and neutralization of acidic wastewater generated during the bacterial oxidation of sulfide gold-bearing concentrates. The upper overflow of the counter-current decantation unit PTD-1 of the bacterial oxidation section of Hydrometallurgical Plant No. 3 was used as the research object. The studied solution was characterized by high acidity (pH 1.2) and a density of 1.032 g/cm³. Mass spectrometric analysis revealed a multicomponent composition containing iron, copper, arsenic, nickel, cobalt, manganese, magnesium, calcium, potassium, sodium, lead, antimony, silver and other elements. The highest concentration among the determined metallic components was observed for iron and amounted to 13.7 g/L. The sulfate concentration reached 43.0 g/L, arsenic 1.87 g/L and copper 327.4 mg/L. Experimental neutralization was performed using $CaCO_3$, CaO and NaOH; the final pH values reached 6.20, 7.40 and 6.46, respectively. X-ray phase analysis of the solid material confirmed the presence of gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) and other mineral phases. The results indicate that selection of a neutralizing reagent should consider both the achieved pH and the phase composition of the resulting precipitate.

Ключевые слова: кислые стоки, бактериальное окисление, гидрометаллургия, сульфидные концентраты, нейтрализация, мышьяк, сульфаты.

Keywords: acidic wastewater, bacterial oxidation, hydrometallurgy, sulfide concentrates, neutralization, arsenic, sulfates.

Введение

Современное развитие гидрометаллургических технологий переработки минерального сырья сопровождается увеличением объёмов технологических растворов и сточных вод, содержащих широкий спектр растворённых неорганических компонентов. Особую группу представляют кислые растворы, образующиеся при переработке сульфидного сырья, в том числе при бактериальном окислении упорных золотосодержащих концентратов[5,10].

Актуальность переработки таких растворов обусловлена одновременно экологическими и технологическими факторами. С одной стороны, кислые стоки характеризуются низкими значениями pH и содержат растворённые соединения железа, меди, цинка, никеля, мышьяка, сурьмы и других элементов. При попадании таких растворов в окружающую среду они могут оказывать отрицательное воздействие на почву и водные объекты. С другой стороны, высокая концентрация отдельных компонентов позволяет рассматривать кислые стоки как техногенное вторичное сырьё, пригодное для получения полезных продуктов.

Одним из перспективных процессов предварительной переработки упорного золотосодержащего сульфидного сырья является бактериальное окисление. В процессе жизнедеятельности ацидофильных микроорганизмов происходит окисление сульфидных минералов, в результате чего разрушается минеральная матрица, в которой заключены ценные компоненты. Бактериальное окисление сопровождается формированием кислой сульфатной жидкой фазы, состав которой необходимо учитывать при выборе последующей стадии нейтрализации [1, 7,11].

При окислении сульфидных минералов часть железа и других элементов переходит в жидкую фазу. Одновременно формируется сульфатная среда и поддерживается высокая кислотность раствора. Состав образующегося раствора зависит от минерального состава исходного концентрата, степени его окисления, продолжительности процесса, кислотности среды и активности микроорганизмов [2, 3, 6].

Ключевой операцией при переработке кислых стоков является нейтрализация, позволяющая снизить кислотность раствора и подготовить воду к дальнейшему технологическому использованию. При выборе реагента необходимо учитывать его расход, достигаемое значение pH и влияние на состав образующихся твёрдых фаз [4, 8, 9].

Целью исследования является изучение химического состава кислого стока, образующегося при бактериальном окислении сульфидных золотосодержащих концентратов, определение основных компонентов, представляющих технологический и экологический интерес, и обоснование направлений его нейтрализации.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся кислый технологический раствор – верхний слив противоточного декантатора ПТД-1, образующийся в цехе бактериального окисления Гидрометаллургического завода №3. Исходный раствор имел pH = 1,2 и плотность ρ = 1,032 г/см³. Объём раствора, использованный в опыте по нейтрализации, составлял 1,0 л. Элементный состав раствора определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе ИС-ICP-MS-7500. Массовую концентрацию хлорид-, нитрат- и сульфат-ионов в технологическом растворе определяли титриметрическими методами.

Определение хлорид-ионов. Метод измерений – титриметрический, основан на количественном взаимодействии хлорид-ионов, с ионами серебра, содержащимися в добавленном к анализируемой пробе, точно отмеренном и взятом в избытке объеме нитрата серебра, с образованием осадка хлорида серебра

$Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl\downarrow$

Избыток ионов серебра оттитровывают в азотнокислой среде раствором аммония роданистого или калия роданистого

$AgNO_3 + NH_4SCN \rightarrow AgSCN\downarrow + NH_4NO_3$

Точку эквивалентности определяют в присутствии железоаммонийных квасцов, применяемых в качестве индикатора. После полного связывания ионов серебра появляется неисчезающее красновато-коричневое окрашивание анализируемого раствора, обусловленное образованием роданида железа

$6NH_4SCN + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 2Fe(SCN)_3 + 3(NH_4)_2SO_4$

По разности израсходованных объемов роданида аммония, пошедшего на титрование точно отмеренного объема нитрата серебра (V_x) и на титрование избытка нитрата серебра (V), оставшегося после взаимодействия с хлорид-ионами анализируемой пробы – определяют объем роданида аммония эквивалентный объему нитрата серебра, израсходованного на реакцию осаждения хлорид-ионов (V_x - V).

Определение нитрат ионов. Метод основан на реакции восстановления в сернокислой среде нитрат-ионов ионами железа (II), содержащимися в точно отмеренном объеме раствора соли Мора, взятом с избытком

$6FeSO_4 + 2HNO_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3Fe_2(SO_4)_3 + 2NO + 4H_2O$

Избыток ионов железа (II) окисляется ионами хрома (VI) в процессе титрования раствором дихромата калия в присутствии индикатора дифениламиносульфоната натрия.

Определение сульфат ионов. Выполнение измерений массовой концентрации сульфатов титриметрическим методом основано на образовании труднорастворимого сульфата бария при прибавлении раствора хлорида бария к анализируемому раствору. После практически полного осаждения сульфатов избыток ионов бария реагирует с индикатором с образованием комплексного соединения. При этом окраска раствора изменяется от сине-фиолетовой (фиолетовой) до голубой. Для уменьшения растворимости осадка сульфата бария титрование проводят в водно-спиртовой или водно-ацетоновой среде.

Первоначально образующиеся частицы сульфата бария слишком малы, чтобы их можно было фильтровать и промывать. Поэтому важным этапом является созревание осадка, в процессе которого формируются более крупные кристаллы:

$Ba^{2+}_{(р\text{-}р)} + SO_4^{2-}{}_{(р\text{-}р)} \rightarrow BaSO_{4(тв.)}$

Сульфат бария осаждают из кислого раствора, что повышает избирательность осаждения. Однако если кислотность раствора слишком велика, часть осадка сульфата бария растворяется. Для того чтобы осаждение считалось количественным, потеря массы сульфата бария за счет растворимости не должна превышать величину абсолютной погрешности взвешивания используемых аналитических весов. Для уменьшения растворимости осадка вводят небольшой избыток осадителя (хлорида бария).

Тонкий кристаллический осадок сульфата бария обычно фильтруют через плотный беззольный бумажный фильтр и промывают несколько раз декантацией. Этот осадок не пептизируется, поэтому его можно промывать чистой водой. Чтобы потери в массе сульфата бария за счет растворимости при промывании были незначимы, следует избегать слишком долгого промывания осадка и прибавления больших объемов промывной жидкости. Для

окончательного удаления следов примесей с поверхности осадка, находящегося на фильтре, сульфат бария несколько раз промывают на фильтре до отрицательной реакции на присутствие хлорид-ионов в промывных водах.

Для нейтрализации исследовали карбонат кальция ($CaCO_3$), оксид кальция (CaO) и гидроксид натрия (NaOH): реагенты вводили постепенно при перемешивании с периодическим контролем pH. Образовавшийся твёрдый материал исследовали методом рентгенофазового анализа. Рентгенофазовый анализ проводился на порошковых рентгеновских диффрактометерах «Panalytical Empyrean» и «Shimadzu XRD-6100». Порошки образца тщательно мешались для получения образца со средним содержанием. Полуколичественный рентгенофазный анализ методом Риетвелда производился на программном обеспечении “Profex – Open source XRD and Reitveld Refinement”

Результаты и обсуждение

Образование кислого стока связано с окислением сульфидных минералов и переходом продуктов их разрушения в жидкую фазу. Для пирита процесс условно может быть представлен следующей последовательностью реакций:

$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4$

$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O$

В процессе биоокисления формируется сложная многокомпонентная жидкая фаза, содержащая сульфат-ионы и растворённые соединения различных элементов. Её состав определяется минеральным составом исходного сырья, степенью окисления сульфидов, продолжительностью процесса и условиями бактериального окисления.

Химический состав исследуемого стока. Результаты анализа образца представлены в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав кислого стока верхнего слива ПТД-1

Компонент	Содержание, мг/л	Содержание, г/л
Ag	<0,005	<0,000005
Al	159	0,159
As	1870	1,870
B	3,51	0,00351
Ba	1,73	0,00173
Be	0,0253	0,0000253
Ca	226	0,226
Cd	0,136	0,000136
Co	0,045	0,000045
Cr	0,956	0,000956
Cu	327,4	0,3274
Fe	13700	13,700
K	185	0,185
Li	0,401	0,000401
Mg	702	0,702
Mn	35,4	0,0354

Компонент	Содержание, мг/л	Содержание, г/л
Mo	0,361	0,000361
Na	546	0,546
Ni	24,8	0,0248
P	52,2	0,0522

Из таблицы 1 видно, что исследуемый раствор содержит значительные количества растворённых компонентов, среди которых экологически значимым является мышьяк. Его концентрация составляет 1870 мг/л, или 1,87 г/л. Высокое содержание сульфат-ионов и низкое значение pH определяют необходимость проведения нейтрализации перед возвратом воды в технологический цикл.

Существенное экологическое значение имеет содержание мышьяка - 1870 мг/л, или 1,87 г/л. Следовательно, в 1 м³ исследуемого раствора потенциально содержится около 1,87 кг мышьяка. Поэтому при разработке технологической схемы необходимо обеспечить его контролируемое удаление и исключить перенос мышьяка в конечную оборотную воду.

Значительные концентрации также характерны для магния (702 мг/л), натрия (546 мг/л), меди (327,4 мг/л), кальция (226 мг/л), калия (185 мг/л) и никеля (24,8 мг/л). Наличие одновременно основных, цветных и токсичных компонентов подтверждает необходимость последовательного разделения раствора, а не его прямой нейтрализации. Для образца установлены следующие показатели:

Таблица 2. Основные физико-химические показатели кислого стока

Показатель	Значение
pH	1,20
Плотность, г/см³	1,032
Cl^-, мг/л	1773
SO_4^{2-}, мг/л	43002
SO_4^{2-}, г/л	43,002
NO_3^-, мг/л	28

Содержание сульфат-ионов достигает 43,002 г/л. В пересчёте на 1 м³ раствора это около 43,0 кг сульфат-ионов. Высокая концентрация сульфатов является закономерным следствием окисления сульфидной составляющей исходного сырья. При этом pH = 1,2 характеризует раствор как сильно кислый. Следует различать показатель pH и массовую концентрацию свободной серной кислоты: для определения последней необходим отдельный титриметрический анализ.

Плотность раствора 1,032 г/см³ также характеризует значительное содержание растворённых компонентов. В совокупности pH, плотность и ионный состав подтверждают, что верхний слив ПТД-1 представляет собой концентрированный кислый технологический раствор, химический состав которого может изменяться в зависимости от условий процесса бактериального окисления и противоточной декантации.

Нейтрализация является основной стадией переработки кислых стоков, образующихся в процессе бактериального окисления сульфидного сырья. Эффективность данной стадии определяется способностью нейтрализующего реагента снижать кислотность раствора до заданного значения pH, а также влиянием реагента на состав образующихся твёрдых фаз. При этом необходимо учитывать высокое содержание сульфат-ионов в кислых стоках, вследствие чего применение кальцийсодержащих реагентов может сопровождаться образованием малорастворимых сульфатных соединений.

Таблица 3. Нейтрализация кислого стока

Реганет	**расход**	**pH**	**расход**	**pH**	**расход**	**pH**	**расход**	**pH**	**Общий расход**
$CaCO_3$	20,0	**2,42**	10,0	**2,66**	10,0	**3,15**	10,0	**6,20**	50г
CaO	20,0	**2,48**	5,0	**2,68**	10,0	**5,67**	0,0	**7,40**	35г
NaOH	13,0	**2,65**	5,0	**2,96**	5,0	**3,22**	5,0	**6,46**	28г

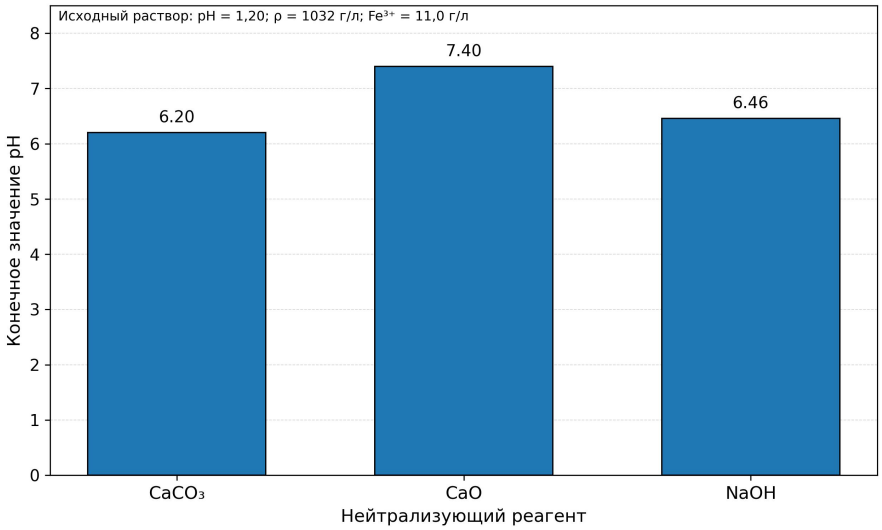


Рисунок 1. Влияние вида нейтрализующего реагента на конечное значение pH кислого стока ПТД-1

Полученные результаты показывают (табл. 3), что нейтрализация должна рассматриваться не только как операция повышения pH, но и как процесс, влияющий на фазовый состав образующегося твёрдого материала. Поэтому при выборе реагента необходимо учитывать достигаемое значение pH, его расход и характер формирующихся фаз.

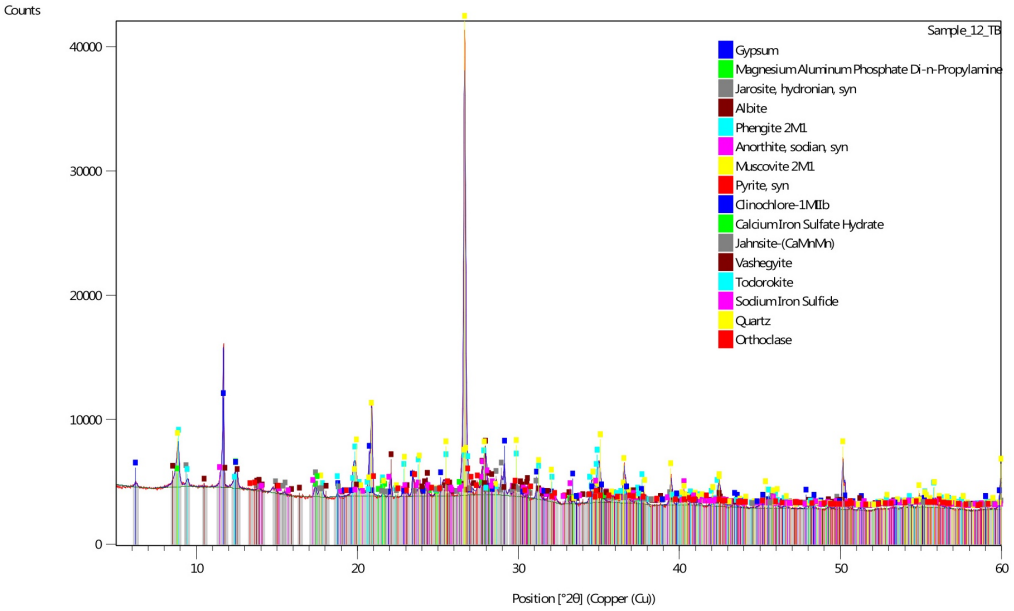


Рисунок 2. Рентгенограмма осадка после обработки кислого стока ПТД-1

Полученный твёрдый материал при нейтрализации кальцийсодержащим реагентом (CaO) был исследован методом рентгенофазового анализа. Согласно рентгенограммы (рис.2), в составе образца идентифицирован гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), а также кварц, альбит, анортит, ортоклаз, мусковит, фенгит и другие минеральные фазы. Наличие гипса подтверждает возможность образования кальцийсодержащих сульфатных соединений при обработке кислого раствора.

Таким образом, при нейтрализации кальцийсодержащими реагентами происходит не только снижение кислотности, но и изменение фазового состава твёрдой фазы вследствие связывания сульфат-ионов.

$CaO + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4\downarrow + H_2O$

$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O$

Установлено, что применение всех исследованных реагентов обеспечивало существенное повышение pH исходного кислого раствора. При использовании $CaCO_3$ конечное значение pH достигало 6,20, для CaO - 7,40, а при применении NaOH - 6,46. Наиболее высокое конечное значение pH получено при использовании CaO.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждают, что нейтрализация кислого стока представляет собой не только процесс повышения pH, но и сложный физико-химический процесс формирования твёрдой фазы. Полученные данные необходимо учитывать при разработке технологии нейтрализации и последующего обращения с образующимся осадком.

Наличие гипса имеет принципиальное значение при рассмотрении процесса нейтрализации кислых сульфатных стоков с применением кальцийсодержащих реагентов. При введении $CaCO_3$ или CaO в раствор создаются условия для связывания сульфат-ионов кальцием и формирования сульфата кальция; в зависимости от условий кристаллизации он может присутствовать в гидратированной форме - гипса. Поэтому образование гипса следует учитывать при оценке фазового состава осадка и при выборе нейтрализующего реагента.

Заключение

Исследование показало, что верхний слив ПТД-1 цеха бактериального окисления ГМЗ-3 представляет собой многокомпонентный кислый технологический раствор. Значение pH составляет 1,2, плотность – 1,032 г/см³, а содержание сульфат-ионов достигает 43,002 г/л.

Экспериментальная нейтрализация с использованием $CaCO_3$, CaO и NaOH показала возможность повышения pH кислого стока до 6,20; 7,40 и 6,46 соответственно. Наиболее высокое конечное значение pH получено при применении CaO.

Рентгенофазовый анализ твёрдого материала подтвердил наличие гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), что указывает на образование кальцийсодержащих сульфатных фаз при нейтрализации кислого раствора. Следовательно, выбор нейтрализующего реагента должен учитывать не только достижение требуемого pH, но и влияние процесса на фазовый состав образующегося материала и качество обработанной воды.

Список литературы

1. Лобанов Д.З., Верникова Л.М. Микробиологическое выщелачивание металлов: учебное пособие. – М.: МГРИ, 2006. – 192 с.
2. Санакулов К.С., Мухиддинов Б.Ф., Шарипов С.Ш., Умразаков А.Т. Исследование изменения концентрации ионов металлов в бактериальном окислении флотоконцентрата в жидкой фазе // Горный вестник Узбекистана. – 2020. – № 4. – С. 24–28.
3. Санакулов У.К., Тажибаев Д.Ю. Способ переработки кислых сбросных растворов процесса биоокисления сульфидных флотоконцентратов: патент FAP 03129. – 2018.
4. Шарипов С.Ш., Мухиддинов Б.Ф. Бактериальное выщелачивание сульфидных флотоконцентратов // Universum: технические науки. – 2020. – № 12. – С. 97–100.
5. Andrianandraina S.H., Darvishi-Alamdari H., Blais J.-F. Reuse of Acid Bioleachate in Bacterial Oxidation of a Refractory Gold Sulfide Concentrate // Minerals. – 2022. – T. 12, № 9. – Art. 1087. – DOI: 10.3390/min12091087.
6. Hernández P., Recio G., Schwarz A. et al. Arsenic (III) and arsenic (V) removal from acidic mine waters using an acidophilic sulfate-reducing bioreactor // Hydrometallurgy. – 2023. – T. 221. – Art. 106137. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106137.
7. Kara I.T., Kremser K., Wagl, S.T. et al. Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: a review // Environmental Chemistry Letters. – 2023. – T. 21. – P. 3329–3350. – DOI: 10.1007/s10311-023-01611-4.
8. Maltrana V., Morales J. The Use of Acid Leaching to Recover Metals from Tailings: A Review // Metals. – 2023. – T. 13, № 11. – Art. 1862. – DOI: 10.3390/met13111862.
9. Xu L., Zheng Y., Zhao Y., Chen W. Recovery of arsenic oxide, harmless gypsum residue and clean water by lime neutralization and precipitation // Hydrometallurgy. – 2023. – T. 215. – Art. 105996. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105996.
10. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Mamba B.B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review // Journal of Cleaner Production. – 2017. – T. 151. – P. 475–493. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.

11. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R. McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment // Mine Water and the Environment. – 2017. – T. 36. – P. 133–153. – DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.

References

1. Lobanov D.Z., Vernikova L.M. [Microbiological Leaching of Metals: A Study Guide. Moscow: MGRI, 2006. 192 P.] (In Russ.).
2. Sanakulov K.S., Mukhiddinov B.F., Sharipov S.Sh., Umrazakov A.T. [Investigation of Changes in Metal Ion Concentration in Bacterial Oxidation of Flotation Concentrate in the Liquid Phase] // Gornyj vestnik Uzbekistana. – 2020. – No. 4. (In Russ.).
3. Sanakulov U.K., Tazhibaev D.Yu. [Method for Processing Acidic Waste Solutions from Biooxidation of Sulfide Flotation Concentrates: Patent FAP 03129]. – 2018. (In Russ.).
4. Sharipov S.Sh., Mukhiddinov B.F. [Bacterial Leaching of Sulfide Flotation Concentrates] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2020. – No. 12. (In Russ.).
5. Andrianandraina S.H., Darvishi-Alamdari H., Blais J.-F. Reuse of Acid Bioleachate in Bacterial Oxidation of a Refractory Gold Sulfide Concentrate // Minerals. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – Art. 1087. – DOI: 10.3390/min12091087.
6. Hernández P., Recio G., Schwarz A. et al. Arsenic (III) and arsenic (V) removal from acidic mine waters using an acidophilic sulfate-reducing bioreactor // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 221. – Art. 106137. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106137.
7. Kara I.T., Kremser K., Wagl S.T. et al. Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: a review // Environmental Chemistry Letters. – 2023. – Vol. 21. – P. 3329–3350. – DOI: 10.1007/s10311-023-01611-4.
8. Maltrana V., Morales J. The Use of Acid Leaching to Recover Metals from Tailings: A Review // Metals. – 2023. – Vol. 13, No. 11. – Art. 1862. – DOI: 10.3390/met13111862.
9. Xu L., Zheng Y., Zhao Y., Chen W. Recovery of arsenic oxide, harmless gypsum residue and clean water by lime neutralization and precipitation // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 215. – Art. 105996. – DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105996.
10. Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Mamba B.B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 151. – P. 475–493. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.
11. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R. McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment // Mine Water and the Environment. – 2017. – Vol. 36. – P. 133–153. – DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1.