МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СОРБЦИОННОГО ЦИАНИРОВАНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО ОГАРКА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Азимов Ойбек Ахмадович
канд. техн. наук, доцент,
Навоийский государственный горно-технологический университет,
Узбекистан, г. Навои

Саттарова Шахло Гайвилло кизи
докторант,
Навоийский государственный горно-технологический университет,
Узбекистан, г. Навои

Фузайлов Омон Убайдуллоевич
PhD, Навоийский государственный горно-технологический университет,
Узбекистан, г. Навои

Хужамов Умиджон Умаркулович
PhD, Навоийский государственный горно-технологический университет,
Узбекистан, г. Навои
E-mail: xujamovumid@gmail.com

Нарзуллаев Жахонгир Норбобо угли
PhD, Навоийский государственный горно-технологический университет,
Узбекистан, г. Навои

INTENSIFICATION OF THE SORPTION CYANIDATION PROCESS OF GOLD-BEARING CINDER BY USING ULTRASONIC TREATMENT

Azimov Oybek Axmadovich
PhD in Engineering, Associate Professor,
Navoi state university of mining and technologies,
Republic of Uzbekistan, Navoi

Sattarova Shaxlo Gayvillo kizi
Doctoral student,
Navoi state university of mining and technologies,
Republic of Uzbekistan, Navoi

Fuzaylov Omon Ubaydulloyevich
Doctor of philosophy,
Navoi state university of mining and technologies,
Republic of Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СОРБЦИОННОГО ЦИАНИРОВАНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО ОГАРКА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Азимов О.А. [и др.]. 2025. 10(139). URL: *https://7universum.com/ru/tech/archive/item/21074*

Khujamov Umidjon Umarkulovich
Doctor of philosophy,
Navoi state university of mining and technologies,
Republic of Uzbekistan, Navoi

Narzullayev Jahongir Norbobo ugli
Doctor of philosophy,
Navoi state university of mining and technologies,
Republic of Uzbekistan, Navoi

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования влияния предварительной ультразвуковой обработки (УЗО) на эффективность гидрометаллургического извлечения золота из огарка, полученного при обжиге упорной золотосодержащей руды. Проведен анализ существующих проблем переработки упорного и техногенного золотосодержащего сырья. Экспериментально установлено, что УЗО является эффективным методом интенсификации процесса сорбционного цианирования, позволяя активировать поверхность частиц золота и улучшить кинетику процесса. В ходе лабораторных исследований было определено оптимальное время ультразвукового воздействия на пульпу. Установлено, что обработка в течение 15-30 минут при частоте 40 кГц позволяет снизить остаточное содержание золота в хвостах сорбции с 2,28 г/т (в контрольном опыте без УЗО) до 2,07 г/т. Это свидетельствует о дополнительном извлечении 9,2% золота, теряемого в стандартных условиях, и подтверждает перспективность данного метода для повышения технико-экономических показателей переработки техногенного сырья.

ABSTRACT

The article presents the results of a study on the effect of preliminary ultrasonic treatment (UST) on the efficiency of hydrometallurgical gold extraction from cinder obtained during the roasting of refractory gold-bearing ore. An analysis of existing problems in the processing of refractory and technogenic gold-bearing raw materials was carried out. Experiments have shown that UST is an effective method for intensifying the sorption cyanidation process, allowing the surface of gold particles to be activated and improving the kinetics of the process. During laboratory studies, the optimal time for ultrasonic exposure to the pulp was determined. It was found that treatment for 15-30 minutes at a frequency of 40 kHz reduces the residual gold content in the sorption tails from 2.28 g/t (in the control experiment without UZ) to 2.07 g/t. This indicates an additional extraction of 9.2% of gold lost under standard conditions and confirms the promise of this method for improving the technical and economic indicators of processing man-made raw materials.

Ключевые слова: упорные руды, техногенное сырье, огарок, сорбционное цианирование, ультразвуковая обработка, интенсификация, извлечение золота, активация поверхности, акустическая кавитация.

Keywords: refractory ores, technogenic raw materials, tailings, sorption cyanidation, ultrasonic treatment, intensification, gold extraction, surface activation, acoustic cavitation.

Введение

Истощение запасов легкообогатимых золотосодержащих руд является глобальной тенденцией в мировой горнодобывающей промышленности. В связи с этим все большее значение приобретает вовлечение в переработку упорных (труднообогатимых) руд, а также техногенных отходов горно-металлургического производства, таких как хвосты обогащения и огарки пирометаллургических процессов [2]. Характерной особенностью такого сырья является наличие тонко- и тончайшевкрапленного золота, его тесная ассоциация с сульфидными минералами, а также присутствие природных сорбентов (углистого вещества), которые пагубно влияют на показатели извлечения при использовании стандартной технологии цианирования [3].

Одной из ключевых проблем, снижающих эффективность цианирования, является пассивация поверхности самородного золота. Образование тончайших пленок оксидов, сульфидов или комплексных соединений на поверхности золотин резко снижает скорость их взаимодействия с цианистым растворителем, что ведет к неполному извлечению и значительным потерям ценного компонента с отвальными хвостами [1, 2]. Для решения этой проблемы разрабатываются и внедряются различные методы интенсификации, направленные на вскрытие упорной минеральной матрицы и активацию поверхности ценных компонентов.

Одним из перспективных направлений является применение физических методов воздействия на минеральное сырье перед или в процессе выщелачивания. Среди них особое место занимает ультразвуковая обработка. Влияние ультразвука на гетерогенные процессы в системах "жидкость-твердое" основано на явлении акустической кавитации – образовании, росте и схлопывании микроскопических пузырьков в жидкости. Этот процесс генерирует мощные локальные эффекты: ударные волны, кумулятивные микроструи, высокие температуры и давления [6].

Многочисленные исследования подтверждают, что такое воздействие способно вызывать диспергирование и деагломерацию частиц, очистку их поверхности от пленок различной природы, а также

образование микротрещин, что в совокупности увеличивает удельную поверхность реагирования и ускоряет массоперенос [4, 6]. В частности, показано, что УЗО позволяет интенсифицировать процессы выщелачивания меди из халькопирита, никеля из пентландита и других металлов из сульфидного сырья [6].

Применительно к золотосодержащим рудам, механизм действия УЗО заключается, в первую очередь, в "акустической очистке" поверхности золотин от пассивирующих слоев [5]. Это приводит к восстановлению химической активности золота по отношению к цианистому раствору, что ведет к более полному и быстрому его растворению. Кроме того, ультразвук способствует вымыванию тонких частиц золота из микротрещин вмещающих минералов, делая их доступными для реагента [4]. Несмотря на очевидные преимущества, вопросы определения оптимальных параметров УЗО (частоты, мощности, времени обработки) для каждого типа сырья требуют детального экспериментального изучения, что и определяет актуальность настоящей работы.

В данном исследовании рассматривается возможность интенсификации процесса сорбционного цианирования огарка, полученного из руды, с помощью предварительной ультразвуковой обработки (УЗО). Целью работы является экспериментальное обоснование эффективности применения ультразвука для удаления с поверхности частиц золота пассивирующих пленок и легкоплавких примесей, активации его поверхности и, как следствие, повышения полноты извлечения при последующем цианировании.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служил огарок, полученный после окислительного обжига концентрата упорной золотосодержащей руды. Исходное содержание золота в огарке, определенное пробирным методом с атомно-абсорбционным окончанием, составляло 6,93 г/т.

Минералогический состав огарка, изученный методом рентгенофазового анализа, представлен преимущественно кварцем (30,3%), мусковитом (21,0%) и гипсом (15,6%). Также в составе присутствуют альбит, гематит, тальк, ангидрит ($CaSO_4$), магнетит/маггемит и рутил. Электронно-микроскопический анализ показал, что частицы огарка имеют высокопористую, губчатую структуру, а золото представлено наноразмерными частицами (Рис. 2), что обуславливает необходимость применения гидрометаллургических методов для его извлечения. Рисунок 1 показывает рентгенофазний анализ огарка упорной золотосодержащей руды.

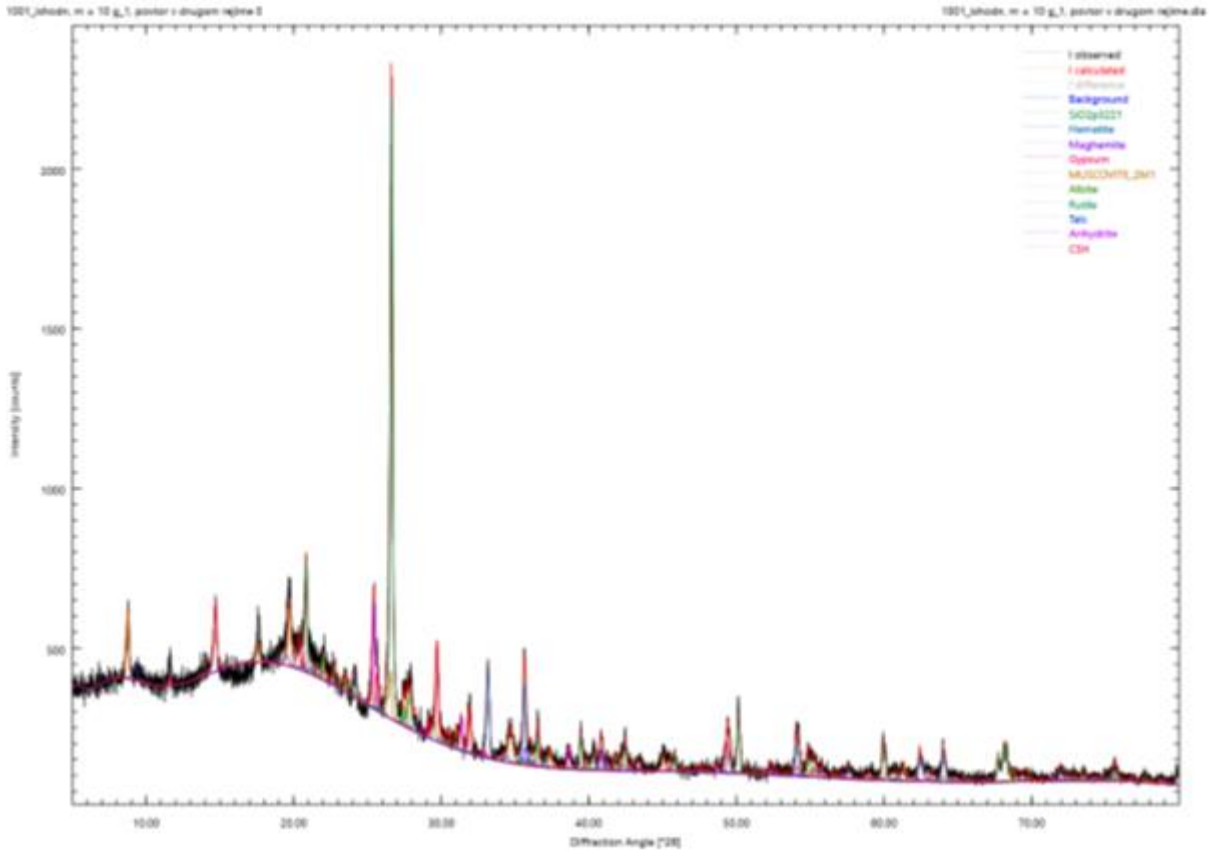

Рисунок 1. Рентгенограмма огарка упорной золотосодержащей руды

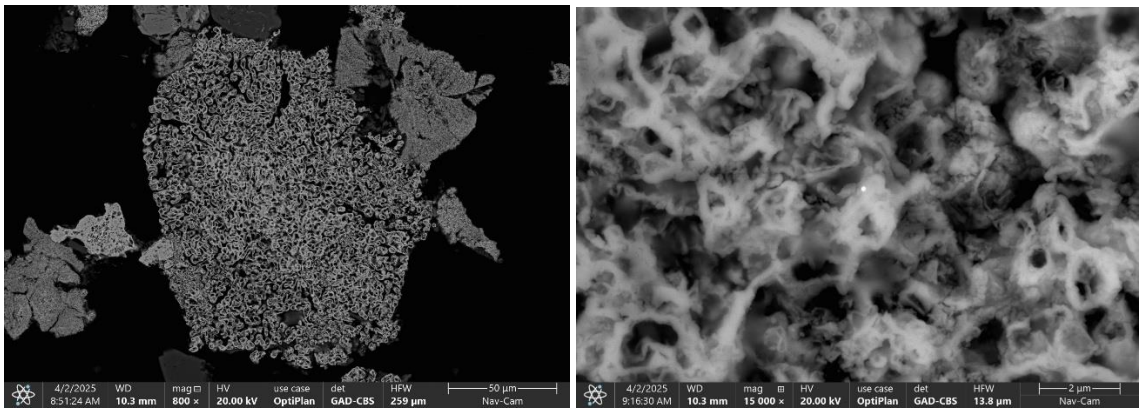

Рисунок 2. Изображение полученной сканирующим электронном микроскопом огарка упорной золотосодержащей руды

Ультразвуковую обработку пульпы (соотношение Ж:Т = 2:1) проводили перед цианированием в лабораторном аппарате модели 621.05.006 фирмы «ISOLAB» (Германия). Рабочая частота аппарата составляет 40 кГц. В ходе экспериментов продолжительность УЗО варьировалась в диапазоне от 3 до 30 минут.

Процедура сорбционного цианирования осуществлялась в лабораторных пачуках по методике, близкой к описанной в работах В.В. Лодейщикова [3]. Перемешивание и аэрация пульпы обеспечивались подачей сжатого воздуха через отверстие в коническом дне аппарата. Процесс вели в течение 24 часов. В качестве сорбента применяли активированный уголь в количестве 6% от массы твердого. Параметры процесса поддерживались на следующем уровне: исходная концентрация цианида натрия (NaCN) – 270 г/т, pH в диапазоне 9,0-9,5. Корректировка концентрации NaCN и значения pH производилась каждые 2 часа.

Аналитический контроль. По окончании процесса пульпу фильтровали, разделяя на твердую (хвосты) и жидкую фазы. Содержание золота в хвостах сорбции определяли на атомно-абсорбционном спектрометре, что позволяло рассчитать степень его извлечения.

Результаты и обсуждения

Для объективной оценки эффективности предложенного метода интенсификации был проведен контрольный опыт сорбционного цианирования огарка в стандартном режиме, без этапа предварительной УЗО. В результате, остаточное содержание золота в твердом кеке составило 2,28 г/т. Этот показатель характеризует количество золота, которое не удалось извлечь при стандартных условиях, и был принят в качестве базового для сравнительного анализа.

Далее была проведена серия экспериментов, в которых пульпа перед цианированием подвергалась ультразвуковому воздействию различной продолжительности. Основные результаты исследований, отражающие содержание золота в хвостах сорбции в зависимости от времени УЗО, сведены в Таблицу 1.

Анализ полученных данных (Таблица 1) наглядно демонстрирует выраженный положительный эффект от применения УЗО. Даже кратковременная обработка в течение 3-5 минут позволяет снизить содержание золота в хвостах на 7,5-8,8% относительно контрольного опыта.

Таблица 1.

Результаты сорбционного цианирования огарка с применением предварительной УЗО

Наименования образца	Содержания Au г/т		
	в твёрдом	в жидком	в угле
Огарок	2,28	<0,02	0,06
Огарок с Уз 3мин	2,11		0,07
Огарок с Уз 5мин	2,08		0,07
Огарок с Уз 7мин	2,09		0,06
Огарок с Уз 10мин	2,13		0,06
Огарок с Уз 15мин	2,07		0,08
Огарок с Уз 20мин	2,18		0,08
Огарок с Уз 30мин	2,07		0,08

Наиболее высокие показатели были достигнуты при продолжительности обработки 15 минут. В этих условиях остаточное содержание золота в кеке достигло минимального значения – 2,07 г/т. Это соответствует дополнительному извлечению 0,21 г/т золота, которое в стандартных условиях теряется с отходами производства. Таким образом, применение УЗО в оптимальном режиме позволило повысить извлечение "упорного" золота на 9,2%. Интересно отметить, что увеличение времени обработки с 15 до

20 минут привело к некоторому ухудшению показателя (2,18 г/т). Это может быть связано с комплексом явлений, включая возможное переизмельчение и ошламование руды, что затрудняет последующую сорбцию [7]. Однако дальнейшее увеличение времени до 30 минут вновь показало максимальную эффективность. Это указывает на сложный характер воздействия ультразвука и необходимость тщательного подбора режима для каждого конкретного типа сырья [8]. Тем не менее, выход на "плато" эффективности в диапазоне 15-30 минут свидетельствует о достижении практически полной активации доступной поверхности золота. Основной механизм действия УЗО, как уже отмечалось, связан с эффектами акустической кавитации [6]. Мощное гидродинамическое воздействие на межфазной границе "твердое-жидкость" приводит к эрозии и удалению пассивирующих пленок с поверхности золотин [9]. Очищенная и химически активная поверхность значительно быстрее и полнее вступает в реакцию с цианистым комплексом [5], что и обуславливает повышение общей степени извлечения золота.

Заключение

1. Проведенные исследования доказали высокую эффективность применения предварительной ультразвуковой обработки как метода интенсификации сорбционного цианирования золотосодержащего огарка, полученного из упорной руды.

2. Установлено, что УЗО способствует активации поверхности тонкодисперсного золота за счет механизма акустической кавитации, что приводит к значительному повышению полноты его извлечения в раствор.

3. Определен оптимальный диапазон продолжительности ультразвукового воздействия для исследуемого типа сырья, который составляет 15–30 минут при частоте 40 кГц. Применение обработки в данном режиме позволило снизить остаточное содержание золота в хвостах цианирования с 2,28 г/т до 2,07 г/т, что эквивалентно дополнительному извлечению 9,2% ценного компонента.

4. Полученные результаты свидетельствуют о больших перспективах использования технологии УЗО в гидрометаллургии для переработки техногенного сырья сложного вещественного состава. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния мощности ультразвука и возможности совмещения процессов УЗО и выщелачивания для достижения синергетического эффекта.

Список литературы:

1. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. В 2-х томах. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – Т. 2. – 510 с.
2. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. – М.: «Руда и металлы», 2013. – 452 с.
3. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. В 2-х томах. – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2007. – Т. 1. – 786 с.
4. Панин В.В., Чантурия В.А. Роль электрохимической и ультразвуковой обработки в повышении контрастности свойств сульфидных минералов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 5. – С. 150-158.
5. Хайруллина Р.Р., Валиев Р.Р. Интенсификация процесса выщелачивания золота из упорных руд с использованием ультразвука // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 22. – С. 278-280.
6. Feng, D., & Aldrich, C. (2004). A review of the application of ultrasound in hydrometallurgy. Hydrometallurgy, 73(1-2), 1-16.
7. Саидахмедов А.А., Хасанов А.С, Хужамов У.У. Исследование интенсификации процесса фильтрации растворов выщелачивания при переработке техногенных отходов. Universum: технические науки. №9-1 (78), 2020. - С. 62-67.
8. Самадов А.У., Хужакулов Н.Б., Хужамов У.У., Махмудова Ф.М. Изучение возможности усовершенствования технологии переработки руд месторождений «Аджибугут». Academy Научно-методический журнал. №5 (68), 2021. - С. 11-14.
9. Хужамов У.У., Самадов А.У. Анализ способов переработки электронного лома. Universum: технические науки. №1-2 (106), 2023. - С. 19-20.