



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ НА КОНЦЕНТРАЦИОННОМ СТОЛЕ

Азимов О.А. ^{1[0009-0000-1284-5411]}, Саттарова Ш.Г. ^{2[0009-0004-2309-2160]},
Мякота С.В. ^{3[0009-0008-1555-5988]}, Фузайлова О.У. ^{4[0000-0003-1921-8782]}

¹Навоийский государственный горно-технологический университет, PhD., доцент

²Навоийский государственный горно-технологический университет, докторант

³Центральный научно-исследовательский лаборатория АО НГМК, инженер

⁴Навоийский государственный горно-технологический университет, PhD., доцент

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования, посвященного оценке влияния предварительной ультразвуковой обработки (УЗО) на процесс гравитационного обогащения золотосодержащей руды. Обогащение проводилось на лабораторном концентрационном столе модели 51кц. Было проведено сравнение коэффициентов извлечения золота и качества концентрата для классической схемы и схемы с пятиминутной ультразвуковой обработкой пульпы. Установлено, что в исследуемых условиях УЗ оказывала отрицательное влияние на технологические показатели: извлечение золота в концентрате снизилось с 40,92 % до 33,54 %, а содержание золота в нем уменьшилось с 4,70 г/т до 4,38 г/т. В статье проанализированы возможные физико-химические причины этого эффекта, связанные с изменением реологических свойств пульпы вследствие интенсивной дисперсии глинистых минералов, в частности каолинита, присутствующих в руде.

Ключевые слова: золото, гравитационное обогащение, концентрационный стол, ультразвуковая обработка, дезинтеграция, каолинит, реология пульпы, извлечение золота, руда, интенсификация.

Annotasiya. Ushbu maqolada murakkab oltin tarkibli xom-ashyolarni boyitishning gravitatsiya usulida, ultratovushli ishlov berishning ta'sirini baholovchi eksperimental tadqiqot natijalari keltirilgan. Boyitish jarayoni 51кц modelli laboratoriya konsentratsion stolida bajarildi. Klassik sxema va bo'tanani besh minutli ultratovushli ishlov berishni o'z ichiga olgan sxema bo'yicha oltin olish va kontsentratlar sifat ko'rsatkichlarini taqqoslash amalga oshirildi. O'rganilayotgan sharoitlarda ultratovushli ishlov berish jarayon parametrlariga sezilarli salbiy ta'sir ko'rsatgan: konsentratga oltin qazib olish 40,92% dan 33,54% gacha, undagi oltin miqdori esa 4,70 g/t dan 4,38 g/t gacha kamaygan. Maqolada bu ta'sirning mumkin bo'lgan fizik-kimyoviy sabablari tahlil qilinadi, ular rudada mavjud bo'lgan loy minerallarining, xususan, kaolinitning intensiv tarqalishi tufayli bo'tananing reologik xususiyatlarining o'zgarishi bilan bog'liq.

Kalit so'zlar: oltin, gravitatsion boyitish, kontsentratsiya stoli, ultratovush bilan ishlov berish, parchalanish, kaolinit, bo'tana reologiyasi, oltin qazib olish, ruda, intensifikatsiya.

Abstract. This article presents the results of an experimental study evaluating the effect of preliminary ultrasonic treatment (ust) on the process of gravitational enrichment of gold-bearing ore. Enrichment was carried out on a 51kts model laboratory concentration table. A comparison was made between gold recovery rates and concentrate quality for the classic scheme and a scheme that included five minutes of ultrasonic treatment of the pulp. It was found that under the conditions studied, usp had a pronounced negative effect on technological indicators: gold recovery in the concentrate decreased from 40.92% to 33.54%, and the gold content in it decreased from 4.70 g/t to 4.38 g/t. The paper analyzes the possible physicochemical causes of this effect, associated with changes in the rheological properties of the pulp due to the intensive dispersion of clay minerals, in particular kaolinite, present in the ore.

Keywords: gold, gravity separation, concentration table, ultrasonic treatment, disintegration, kaolinite, pulp rheology, gold extraction, ore, intensification.



Введение

Несмотря на развитие более совершенных технологий, методы гравитационной обогащения остаются основой переработки многих видов золотосодержащих руд. Их ключевыми преимуществами являются низкая стоимость, экологичность и высокая эффективность извлечения свободного золота [1]. Концентрационные столы, как классические устройства гравитационного обогащения, предназначены для разделения минералов по плотности в тонком слое проточной воды. Их эффективность напрямую зависит от разницы в плотности между разделяемыми минералами и реологическими свойствами пульпы.

Однако при переработке руд сложного состава, содержащих мелкодисперсное золото и большое количество глинистых минералов, эффективность гравитационной сепарации резко падает. Одной из основных причин этого является образование на поверхности ценных минеральных частиц так называемых «глинистых налётов». Эти налёты, состоящие из мельчайших частиц глины и гидроксидов железа, маскируют истинную плотность минерала, заставляя его вести себя в потоке как более лёгкую частицу, что приводит к его потере с хвостами.

Для решения этой проблемы и интенсификации процесса в целом предлагаются различные методы предварительной обработки целлюлозы. Одним из наиболее перспективных методов считается ультразвуковая обработка. Механизм действия ультразвука основан на явлении акустической кавитации, образовании и разрушении микроскопических пузырьков в жидкости, что создает локальные области огромного давления (до 1000 атм) и температуры [2]. Эти микрогидравлические удары могут вызывать ряд положительных эффектов: Очистка поверхности (десламмация): эффективное разрушение и удаление шламовых плёнок с поверхности минералов. Дезагрегация: разрушение слитых агрегатов частиц, что способствует высвобождению мелких зёрен ценных компонентов.

Ряд исследователей сообщили о положительных результатах использования УЗО. Например, исследования [3] показывают, что обработка кварцевых руд перед гравитационным разделением увеличивает извлечение золота на 5-7%. Однако есть и обратная сторона. Эффект ультразвуковой обработки в значительной степени зависит от минералогии руды. Интенсивное воздействие может привести к нежелательному измельчению хрупких минералов или чрезмерной дисперсии частиц глины (каолинита, монтмориллонита, мусковита), что приводит к резкому увеличению вязкости пульпы и стабилизации суспензии. Как отмечено в [4], такое изменение реологии может полностью нивелировать положительный эффект очистки поверхности, поскольку процесс сепарации на концентрационном столе критически чувствителен к вязкости среды.

Материалы и методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовалась проба упорные золотосодержащие руды.

Таблица 1.
Минералогический состав упорной золотосодержащей руды

| Минерал | Кварц | Анкерит | Мусковит | Альбит | TiO ₂ | Пирит | Хлорит 2b | Анортит | Сидерит | Каолинит |
|---------------|-------|---------|----------|--------|------------------|-------|-----------|---------|---------|----------|
| Содержание, % | 47,3 | 3,3 | 35,4 | 3,5 | 0,3 | 1,3 | 2,4 | 0,9 | 2,4 | 2,6 |

Как видно из таблицы 1. образец содержит преимущественно пирит как золотосодержащий минерал.

Цель данной работы – экспериментально оценить влияние пятиминутной ультразвуковой обработки на технологические показатели гравитационного обогащения золотосодержащей руды месторождения Даугызтау, характеризующейся высоким содержанием слюды и глинистых минералов, на концентрационном столе.

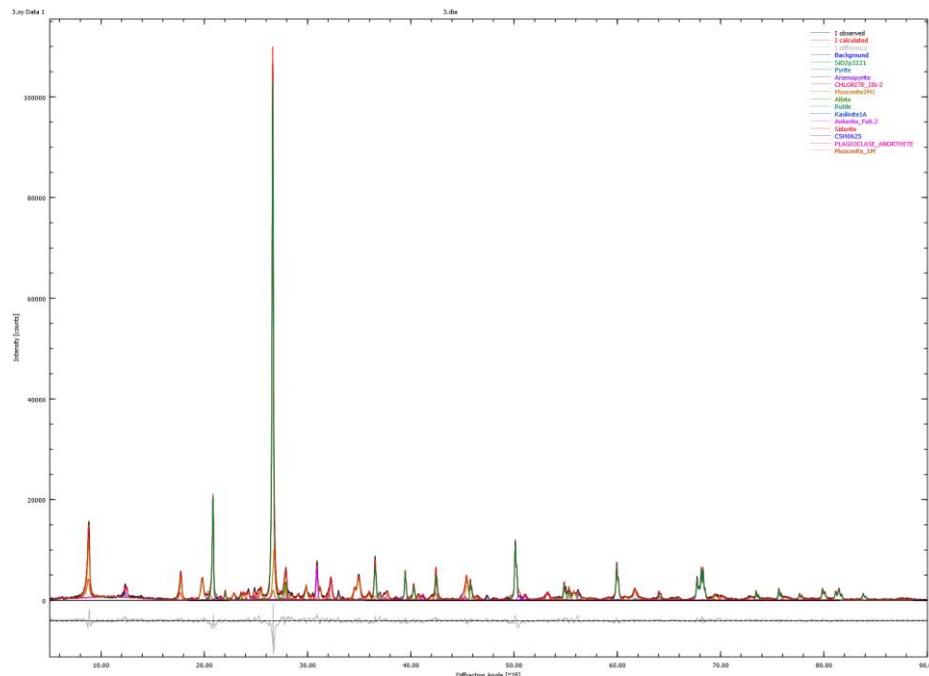


Рис.1. Порошковая дифрактограмма образца.

Данные рентгенодифракционного анализа порошка (рис.1) показали следующий минеральный состав, %: кварц — 47,3; мусковит — 35,4; альбит — 3,5; анкерит — 3,3; каолинит — 2,6; сидерит — 2,4; хлорит 2b — 2,4; пирит — 1,3; анортит — 0,9 и TiO₂ — 0,33. Золото в основном связано с пиритом. Важной особенностью руды, имеющей значение для данного исследования, является высокое общее содержание слюд и глин (мусковит, каолинит, хлорит), превышающее 40 %.

Образец руды весом 10 кг с начальным размером частиц 2 мм измельчали в лабораторной стержневой мельнице KSRM 10 (общий вес стержней 50 кг) в течение 44 минут при соотношении Т:Ж 1:0,6 для достижения оптимального размера частиц перед гравитационным разделением.

Полученную пульпу гомогенизировали и разделили на две равные части, каждая из которых содержала 5 кг руды.

Базовый опыт: Первая часть пульпы без дополнительной обработки была отправлена на гравитационное обогащение на лабораторный концентрационный стол модели 51КЦ. Параметры стола: наклон палубы 5°, расход промывочной воды 10 л/мин, частота колебаний 300 мин⁻¹.

Основной опыт (с УЗО): Вторая часть пульпы была предварительно обработана в 6-литровой ультразвуковой ванне с частотой 40 Гц в течение 5 минут. После обработки пульпы была немедленно подана на концентрационный стол с теми же параметрами, что и в контрольном эксперименте.

Гравитационные концентраты и хвосты, полученные в ходе каждого эксперимента, были высушены, взвешены и отобраны для последующего анализа. Содержание золота определялось с помощью анализа с атомно-абсорбционным завершением.



Результаты и их обсуждение

Сводные результаты сравнительных опытов по обогащению руды на концентрационном столе представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты обогащения на концентрационном столе

| Показатель | Без УЗО | С УЗО (5 мин) |
|---|---------|---------------|
| Выход концентрата, % | 19,56 | 16,30 |
| Содержание Au в концентрате, г/т | 4,70 | 4,38 |
| Извлечение Au в концентрат, % | 40,92 | 33,54 |

Анализ полученных данных ясно показывает, что использование ультразвуковой обработки в исследуемых условиях не только не усилило процесс, но и оказало на него значительное отрицательное влияние. Выход золота в концентрат снизился на 7,38%, а содержание золота в нем уменьшилось на 6,8%.

Этот результат, противоречащий ожиданиям, основанным на деслимации, можно объяснить минералогическим составом руды. Мы полагаем, что доминирующим фактором было негативное воздействие УЗО на рудообразующие минералы. Руда содержит более 40 % мусковита, каолинита и хлорита — минералов с очень совершенной спайностью, легко расщепляющихся на тончайшие чешуйки.

Интенсивная кавитация привела к активной дисперсии этих минералов и их переходу в мелкодисперсную стабильную коллоидную супензию. Это вызвало два основных негативных эффекта:

Резкое увеличение вязкости пульпы: увеличение содержания мелких фракций в жидкой фазе, особенно анизометрических частиц слюды, приводит к экспоненциальному увеличению эффективной вязкости пульпы. На палубе концентрационного стола, где процесс сепарации основан на ламинарном течении тонкой пленки воды и сегрегации частиц в ней, это привело к полному нарушению гидродинамического режима. Вместо четкого распределения минералов вся масса пульпы начала двигаться как единое целое, как вязкая грязь. В таких условиях тяжелые частицы пирита не могли оседать и сегрегироваться в нижние слои потока и уносились в хвосты вместе с основной массой породы.

Помимо вязкости, такая пульпа приобретает начальное сдвиговое напряжение. Это означает, что для начала движения частиц относительно друг друга требуется определенное усилие, что практически невозможно на гравитационном столе. Зерна пирита «заперты» в структурированной структуре из слюды и глинистых чешуек.

Снижение выхода концентрата с 19,56% до 16,30% является прямым следствием этих процессов. Визуально контролируя процесс и видя отсутствие четких границ между минералами, было необходимо уменьшить площадь отбора проб концентрата, чтобы предотвратить его разбавление шламом. Таким образом, теоретически положительный эффект очистки поверхности был полностью аннулирован ухудшением реологических свойств пульпы.

Заключение и перспективы

Эксперименты показали, что предварительная пятиминутная ультразвуковая обработка золотоносной рудной пульпы перед обогащением на концентрационном столе приводит к значительному ухудшению технологических показателей.

Снижение извлечения золота (с 40,92% до 33,54%) и качества концентрата (с 4,70 г/т до 4,38 г/т) является следствием негативного влияния УЗ на реологические свойства пульпы. Причиной этого является интенсивная дисперсия слюдистых и



глинистых минералов (мусковита, каолинита, хлорита), присутствующих в руде в больших количествах.

Для руд с высоким содержанием филлосиликатов использование УЗО в качестве метода подготовки пульпы перед обогащением на концентрационном столе является нецелесообразным и контрпродуктивным.

Для дальнейших исследований рекомендуется изучить влияние УЗО меньшей интенсивности и продолжительности, а также возможность его комбинирования с диспергирующими реагентами, способными снизить негативный реологический эффект.

Список использованной литературы:

- [1]. Петров В.И. Основы обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 2018. – 450 с.
- [2]. Сидоров А.П., Козлов Е.Н. Применение ультразвука для интенсификации процессов флотации и гравитации // Горный журнал. – 2020. – № 5. – С. 80-85.
- [3]. Zhang F., Liu G. (2019). Enhancement of gold recovery from quartz ores by ultrasonic pre-treatment. *Minerals Engineering*, 138, 112-118.
- [4]. Orovwighose C.I., Omidiora Jr O.O. (2021). Effect of Slimes on the Efficiency of Gravity Concentration of Iron Ore Using Shaking Table // Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH), 40(1), 169-176. <https://doi.org/10.4314/njt.v40i1.21>