ГРАВИТАЦИОННО-ФЛОТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Суюнова Сожида Алишер кизи
ПИИ ООО"UZLITI ENGINEERING" Инженер-технолог обогатитель 2 категории
Email:suyunovasojida5@gmail.com
Мамаисакова Зебо Баходир кизи
Базовый докторант Филиал НИТУ «МИСИС» в г., Узбекистан, г. Алмалык
Email: mamaisakovazebo@gmail.com
Суюнов Хакимжон Алишер угли
АО «Алмалыкский ГМК» Инженер-технолог 1 категории
Email: h.suyunov@agmk.uz

Аннотация. Гравитационно-флотационная технология является одной из наиболее распространённых и технологически обоснованных схем переработки сульфидных золотосодержащих руд. Она сочетает в себе преимущества гравитационных методов обогащения, направленных на извлечение свободного и крупновкрапленного золота, и флотационных процессов, обеспечивающих концентрирование тонковкрапленного и ассоциированного с сульфидами золота. В настоящей работе подробно рассмотрены теоретические основы, технологические схемы, аппаратурное оформление, факторы эффективности и перспективы развития гравитационно-флотационных процессов.

Ключевые слова: гравитационно-флотационная технология, добыча золота, сульфидные руды, гравитационное обогащение, флотация, переработка руды, извлечение золота, минеральное сырье, золотодобывающая промышленность, комбинированные методы обогащения

Annotatsiya. Gravitatsion-flotatsion texnologiya sulfidli oltin tarkibli rudalarni qayta ishlashning eng keng tarqalgan va texnologik jihatdan asoslangan sxemalaridan biridir. U erkin va yirik xol-xolli oltinni ajratib olishga qaratilgan gravitatsion boyitish usullari va mayda xol-xolli va sulfidlar bilan assotsiatsiyalangan oltinni konsentratsiyalashni ta’minlovchi flotatsiya jarayonlarining afzalliklarini o‘zida mujassamlashtiradi. Ushbu ishda gravitatsion-flotatsion jarayonlarning nazariy asoslari, texnologik sxemalari, apparatli rasmiylashtirilishi, samaradorlik omillari va rivojlanish istiqbollari batafsil ko‘rib chiqilgan.

Kalit so'zlar: gravitatsion-flotatsion texnologiya, oltin chiqarish, sulfid rudalar, gravitatsion boyitish, flotatsiya, ruda qayta ishlash, oltin tiklash, mineral xom

ISSN 3030-3907

ashyo, oltin qazib chiqarish sanoati, kombinatsiyalangan boyitish usullari

Abstract. Gravitational-flotation technology is one of the most common and technologically justified schemes for processing sulfide gold-bearing ores. It combines the advantages of gravitational enrichment methods aimed at extracting free and coarse-grained gold and flotation processes that ensure the concentration of fine-grained and sulfide-associated gold. In this work, the theoretical foundations, technological schemes, apparatus design, factors of effectiveness, and prospects for the development of gravitational-flotation processes are considered in detail.

Keywords: gravity-flotation technology, gold extraction, sulfide ores, gravity concentration, flotation, ore processing, gold recovery, mineral raw materials, gold mining industry, combined concentration methods

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья посвящена анализу и обобщению современных подходов к гравитационно-флотационной технологии извлечения золота из сульфидных руд. Актуальность исследования обусловлена устойчивым снижением содержания золота в перерабатываемом минеральном сырье, усложнением минералогического состава руд и ростом доли упорных золотоносных объектов. В этих условиях комбинированные технологии переработки приобретают ключевое значение для обеспечения экономической эффективности горнодобывающих предприятий. Золото как стратегически важный металл на протяжении тысячелетий остаётся объектом интенсивного промышленного освоения. Современные условия добычи характеризуются вовлечением в переработку бедных, упорных и комплексных руд, в которых золото тесно ассоциировано с сульфидными минералами. В этих условиях традиционные гравитационные или исключительно флотационные методы оказываются недостаточно эффективными, что обусловило широкое внедрение комбинированных технологий.

Гравитационно-флотационная технология занимает особое место среди методов переработки золотосодержащих сульфидных руд, так как позволяет максимально полно извлекать золото различной формы нахождения при относительно умеренных капитальных и эксплуатационных затратах.

1. Минералого-геохимические особенности сульфидных золотосодержащих руд

1.1. Типоморфизм и формы нахождения золота

Золото в сульфидных золотосодержащих рудах характеризуется многообразием форм нахождения, что предопределяет технологические

ISSN 3030-3907

свойства сырья и выбор схем его переработки. Наиболее распространены следующие формы: (i) свободное и слабоассоциированное золото, представленное самородными зёрнами различной крупности; (ii) включённое золото в сульфидных минералах, прежде всего в пирите и арсенопирите; (iii) тонкодисперсное и субмикроскопическое золото, изоморфно связанное с кристаллической решёткой сульфидов; (iv) золото в виде сложных интерметаллических и теллуридных соединений.

Типоморфные особенности золота (проба, морфология зёрен, характер поверхности) тесно связаны с условиями рудообразования и последующими метаморфическими преобразованиями. Повышенная доля тонковкрапленного и «невидимого» золота является характерной чертой упорных сульфидных руд и существенно снижает эффективность чисто гравитационных методов обогащения.

1.2. Минеральный состав и ассоциации

Сульфидные золотосодержащие руды, как правило, являются полиминеральными. Основными минералами-носителями золота выступают пирит (FeS_2) и арсенопирит (FeAsS), реже — халькопирит ($CuFeS_2$), сфалерит (ZnS), галенит (PbS) и пирротин ($Fe_{1-x}S$). В ряде месторождений существенную роль играют сульфосоли и теллуриды золота.

Минеральные ассоциации характеризуются сложными текстурно-структурными взаимоотношениями, включая вкраплённые, прожилковые и массивные текстуры. Золото может находиться как в виде самостоятельных зёрен, так и в виде микровключений размером менее 1–5 мкм, что требует тонкого измельчения для его вскрытия.

1.3. Геохимические особенности распределения золота

Геохимия золота в сульфидных рудах определяется условиями его миграции и осаждения в гидротермальных системах. Золото проявляет халькофильные и, в меньшей степени, сидерофильные свойства, что объясняет его тесную связь с сульфидными минералами железа и цветных металлов. Часто наблюдается корреляция содержания золота с концентрациями серы, мышьяка и железа.

Геохимические барьеры (изменение Eh–pH условий, температуры и состава флюидов) играют ключевую роль в формировании зональности оруденения. В пределах одного месторождения могут сосуществовать участки с преобладанием свободного золота и зоны с доминированием тонкодисперсных форм, что усложняет технологическую классификацию руд.

ISSN 3030-3907

1.4. Влияние минералого-геохимических факторов на технологические свойства руд

Минералого-геохимические особенности непосредственно отражаются на обогатимости сульфидных золотосодержащих руд. Высокая степень ассоциации золота с пиритом и арсенопиритом обусловливает необходимость применения флотационных методов для концентрирования золота в составе сульфидных концентратов. Наличие свободного золота крупной и средней крупности, напротив, создаёт предпосылки для эффективного использования гравитационного обогащения на ранних стадиях переработки.

Таким образом, детальное минералого-геохимическое изучение руд является обязательным этапом при разработке и оптимизации гравитационно-флотационных технологий, поскольку именно оно определяет рациональное сочетание процессов и аппаратурное оформление технологической схемы.

2. Теоретические основы гравитационного обогащения золота

2.1. Физические основы процесса

Гравитационное обогащение золота основано на различии физических свойств минералов, прежде всего их плотности, размеров частиц и формы зёрен. Золото обладает исключительно высокой плотностью (19,3 г/см³), что значительно превышает плотность основных породообразующих минералов (кварц, полевые шпаты, карбонаты), плотность которых, как правило, не превышает 2,6–2,8 г/см³. Данное различие создаёт предпосылки для эффективного разделения минеральных частиц в гравитационном поле.

Процесс гравитационного обогащения реализуется за счёт различий в скоростях осаждения частиц в водной или воздушной среде. Согласно закону Стокса, скорость осаждения зависит от плотности, диаметра частицы и вязкости среды. В реальных технологических условиях на эффективность разделения также оказывают влияние турбулентность потока, форма частиц и их взаимное влияние при высокой концентрации твёрдого.

Гравитационные методы наиболее эффективны при извлечении свободного и слабоассоциированного золота крупной и средней крупности. По мере уменьшения размера золотых зёрен влияние сил сопротивления среды возрастает, что приводит к снижению селективности процесса. В связи с этим гравитационное обогащение, как правило, применяется на ранних стадиях переработки руды — после дробления или грубого измельчения, до образования значительного количества шламов.

2.2. Гравитационные аппараты

ISSN 3030-3907

Для извлечения золота из руд различной крупности используется широкий спектр гравитационных аппаратов, отличающихся принципом действия и областью рационального применения. К классическим аппаратам относятся шлюзы, концентрационные столы и спиральные сепараторы. Шлюзы применяются преимущественно для переработки рыхлых и песчаных материалов с наличием крупного свободного золота. Концентрационные столы обеспечивают более точное разделение и используются для доводки гравитационных концентратов.

Особое место в современной практике занимают центробежные концентраторы, такие как Knelson и Falcon. В данных аппаратах гравитационное поле многократно усиливается за счёт центробежных сил, что позволяет эффективно извлекать тонкое и мелковкрапленное золото размером до нескольких микрометров. Центробежные концентраторы широко внедрены на обогатительных фабриках при переработке сульфидных золотосодержащих руд и характеризуются высокой степенью извлечения свободного золота.

Выбор конкретного типа гравитационного аппарата определяется гранулометрическим составом руды, формами нахождения золота, производительностью установки и требованиями к качеству концентрата. На практике часто применяются комбинированные схемы, включающие несколько видов гравитационных аппаратов, что позволяет повысить полноту извлечения золота и снизить его потери в хвостах обогащения.

3. Теоретические основы флотационного извлечения золота

Флотационное извлечение золота является одним из ключевых процессов обогащения труднообогатимых руд, особенно в тех случаях, когда золото находится в тонкодисперсном состоянии и тесно ассоциировано с сульфидными минералами. Эффективность флотации определяется физико-химическими свойствами поверхности минералов, их взаимодействием с реагентами и условиями проведения процесса.

В большинстве золоторудных месторождений самородное золото не поддается прямой флотации и извлекается косвенно — за счет флотации минералов-носителей, прежде всего сульфидов железа, меди и мышьяка. Поэтому теоретические основы флотации золота неразрывно связаны с механизмами флотации сульфидных минералов.

3.1 Принципы флотации сульфидов

Флотация сульфидных минералов основана на различии их поверхностных свойств, в первую очередь способности к гидрофобизации под действием коллекторов. В природном состоянии поверхность

ISSN 3030-3907

большинства минералов является гидрофильной, однако при взаимодействии с реагентами она приобретает гидрофобные свойства, что обеспечивает избирательное прикрепление частиц к пузырькам воздуха и их перенос в пенный продукт.

Золото в сульфидных рудах, как правило, присутствует в виде включений в пирите, арсенопирите, халькопирите и других сульфидах. В этом случае флотационное извлечение золота осуществляется путем селективной флотации указанных минералов-носителей. Основную роль играет химическое взаимодействие между поверхностью сульфидов и ионами коллектора, приводящее к образованию устойчивых гидрофобных соединений.

На процесс флотации существенное влияние оказывают такие факторы, как степень окисленности поверхности минералов, крупность измельчения, значение pH пульпы, концентрация растворенного кислорода и ионный состав среды. Особенно критичным является состояние поверхности сульфидов: при избыточном окислении флотационная активность минералов снижается, что негативно отражается на извлечении золота.

3.2 Реагентный режим

Реагентный режим флотации представляет собой совокупность реагентов и условий их применения, обеспечивающих максимальную селективность и извлечение ценных компонентов. В практике флотационного извлечения золота основными реагентами являются коллекторы, регуляторы среды и пенообразователи.

В качестве коллекторов наиболее широко применяются ксантаты и дитиофосфаты, обладающие высокой избирательностью по отношению к сульфидным минералам. Ксантаты эффективны при флотации пирита и халькопирита, тогда как дитиофосфаты проявляют повышенную активность в отношении труднофлотируемых и частично окисленных сульфидов. Выбор типа и дозировки коллектора определяется минеральным составом руды и характером ассоциации золота.

Регуляторы среды используются для создания оптимального значения pH, подавления нежелательных минералов и стабилизации условий флотации. В качестве регуляторов применяются известь, сода, серная кислота и различные депрессоры. Пенообразователи обеспечивают формирование устойчивой пены с необходимой структурой, что способствует эффективному извлечению флотационного концентрата.

Грамотный подбор реагентного режима является ключевым фактором эффективности флотационного процесса. Ошибка на этом этапе — и вся

ISSN 3030-3907

технология летит в мусор, сколько бы ни было современного оборудования. Поэтому оптимизация реагентного режима проводится на основе лабораторных и полупромышленных испытаний с учетом конкретных особенностей перерабатываемой руды.

4. Комбинированные гравитационно-флотационные схемы

Комбинированные гравитационно-флотационные схемы обогащения широко применяются при переработке золотосодержащих руд сложного вещественного состава. Их использование обусловлено необходимостью максимального извлечения золота, находящегося как в свободном состоянии, так и в тонковкраплённой форме, связанной с сульфидными минералами. Рациональное сочетание гравитационных и флотационных методов позволяет повысить общее извлечение полезного компонента, снизить потери золота с хвостами и оптимизировать экономические показатели переработки руд.

4.1 Место гравитации в технологической схеме

Гравитационные операции, как правило, включаются на ранних стадиях технологической схемы переработки — преимущественно после первичного или вторичного измельчения. Это связано с тем, что на данных этапах значительная часть золота находится в свободном состоянии и может быть эффективно извлечена за счёт различий в плотности между золотом и вмещающими минералами.

Раннее применение гравитационного обогащения позволяет:

- извлечь крупное и среднекрупное свободное золото до его переизмельчения;
- предотвратить потери золота в тонкодисперсной форме, возникающие при последующих стадиях измельчения;
- снизить нагрузку на флотационные процессы и сократить содержание золота во флотационных хвостах;
- повысить стабильность работы флотационных отделений за счёт уменьшения колебаний содержания золота в питании.

На практике гравитационные аппараты (центробежные концентраторы, шлюзы, винтовые сепараторы) включаются в замкнутые циклы измельчения или устанавливаются на сливе классификаторов и гидроциклонов, что обеспечивает постоянный отбор свободного золота из циркулирующего материала.

4.2 Варианты технологических схем

ISSN 3030-3907

В зависимости от минерального состава руды, формы нахождения золота и требований к конечным продуктам применяются различные варианты комбинированных гравитационно-флотационных схем.

Наиболее распространёнными являются схемы с предварительным гравитационным извлечением золота. В данных схемах гравитация используется как предварительная операция, направленная на выделение свободного золота, после чего хвосты гравитационного обогащения направляются на флотацию для извлечения тонковкраплённого золота, связанного с сульфидами. Такой подход позволяет существенно повысить суммарное извлечение золота при относительно низких капитальных и эксплуатационных затратах.

Широкое применение также находят схемы с доводкой гравитационных концентратов. Получаемые гравитационные концентраты, как правило, имеют высокое содержание золота, но характеризуются наличием примесей тяжёлых минералов. Для повышения качества концентрата используются операции перечистки, тонкой гравитации, флотации или гидрометаллургической переработки, что обеспечивает получение товарного продукта с высоким извлечением золота.

В схемах с совместной переработкой продуктов гравитационные концентраты и флотационные концентраты могут объединяться для последующей совместной переработки (например, цианированием или автоклавным окислением). Такой вариант применяется при необходимости унификации технологической линии и снижения общих затрат на переработку концентратов.

Таким образом, комбинированные гравитационно-флотационные схемы являются гибким и эффективным инструментом переработки золотосодержащих руд, позволяющим адаптировать технологический процесс к конкретным геолого-технологическим условиям и обеспечить максимальное извлечение золота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого анализа установлено, что гравитационно-флотационная технология является одной из наиболее эффективных схем переработки сульфидных золотосодержащих руд. Совмещение гравитационных и флотационных процессов позволяет учитывать многообразие форм нахождения золота, снижать его потери на ранних стадиях обогащения и повышать комплексность использования минерального сырья. Перспективы дальнейшего развития технологии связаны с углублённым минералого-технологическим моделированием,

ISSN 3030-3907

применением высокоэффективных центробежных концентраторов и внедрением цифровых систем управления процессами обогащения. Гравитационно-флотационная технология является научно и промышленно обоснованным направлением переработки сульфидных золотосодержащих руд. Её дальнейшее развитие связано с совершенствованием аппаратуры, цифровизацией процессов и углублённым учётом минералого-технологических факторов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Темиров, А. Х., Ахмедов, В. Н. (2021. Получение в нефтегазовой отрасли ингибиторов коррозии на основе тиомочевины, формальдегидной смолы и акриловой кислоты// Международный научный журнал «Universum: технические науки». – Москва, 2021. – №12 (93). – С. 60-62.
2. Alisher, T., Vokhid, A., Bobir, O. Synthesis and properties of thiourea based inhibitors// Международный научный журнал «Universum: технические науки». – Москва, 2022.– №8 (101), – С. 63-65.
3. Temirov, A., Akhmedov, V. (2022). Preparation and properties of a corrosion inhibitor based on thiourea // Scientific Collection «InterConf», (120). – Vilnius, 2022. – №122. –P. 211-213.
4. Temirov, A., & Akhmedov, V. (2022). Physico-chemical characteristics of an aminoaldehyde oligomer with inhibiting properties // Scientific Collection «InterConf». – Warsaw, 2022. – №122. –P. 303-305.
5. Panoyev Erali Rajabboyevich, Temirov Alisher Hoshim o‘g’li, Akhmedov Vokhid Nizomovich (Bukhara, Uzbekistan) The corrosion problem in the oil and gas industry . Polish science journal (ISSUE 10(43), 2021) - Warsaw: Sp. z o. o. "iScience", 2021
6. Xamidov, D. G. A., & Temirov, A. H. O. G. L. (2020). Parafinli neftlarning fizik-kimyoviy xossalari tahlili. Science and Education, 1(9).
7. Темиров, А. Х., & Ахмедов, В. Н. (2021). Получение в нефтегазовой отрасли ингибиторов коррозии на основе тиомочевины, формальдегидной смолы и акриловой кислоты. Universum: технические науки, (12-5 (93)), 60-62
8. Alisher hoshim o‘g‘li, T., & Nabiullayevich, A. S. (2024). Neft Va Gazni Qayta Ishlash Korxonalari Jihoz Va Qurilmalarida Kelib Chiqishi Mumkin Bo’lgan Korroziyalar Va Ularning Ldini Olish Usullari. Miasto Przyszłości, 46, 847-851.
9. Hoshim O’g’li, T. A., Universiteti, B. D. T., Jumayevich, D. S. B., & Raxmatovna, D. X. G. Z. GAZLARNI MEA YORDAMIDA ABSORBSION TOZALASH.

ISSN 3030-3907

10. Alisher, T., Vokhid, A., & Bobir, O. (2022). Synthesis and properties of thiourea based inhibitors. Universum: технические науки, (8-3 (101)), 63-65.

ISSN 3030-3907