

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals

Научная статья
УДК 669.334:669.223.4
DOI: 10.14529/met230301

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДИ ИЗ РУДЫ УДОКАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Е.Е. Алексеев, yegoralekseevgenyevich@gmail.com

Е.А. Якуньков, eyakunkov@mail.ru

О.О. Сиверин, siverinoo@susu.ru

Д.Я. Бахманов, dbaxmanov@mail.ru

А.В. Кутергин, kutergin.2014@mail.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В 2023 г. компания ООО «Удоканская медь» завершила строительство первой очереди горно-металлургического комбината (ГМК) и намерена возвести вторую очередь с планируемой ежегодной производительностью до 40 млн т переработанной руды и 400 тыс. т катодной меди. В условиях сложной экономической и геополитической ситуации перед предприятием стоит задача возведения второй очереди ГМК с высокой долей использования отечественных технологий и оборудования. В данной статье описана возможность получения меди из руды Удоканского месторождения с использованием роллер-прессов взамен мельниц полусамоизмельчения, используемых на первой очереди ГМК, а также атмосферного выщелачивания меди с последующими экстракцией/реэкстракцией и электролизом. Описана возможность получения серебра из кека выщелачивания путем цианирования с последующей сорбцией/адсорбцией. В конечном итоге предприятие получит возможность выпускать сульфидный концентрат, катодную медь, удовлетворяющую по химическому составу требованиям Лондонской биржи (LME), и серебро. Данное производство возможно осуществить с использованием до 85 % отечественного оборудования в рудоподготовительном и флотационном цехах и до 80 % – в гидromеталлургическом цехе. Предложены флотореагенты отечественного производства, способные полноценно заменить зарубежные аналоги. Представленные технологии позволят повысить извлечение меди из руды на 1,2–1,5 %. Также были предложены варианты переработки хвостов обогащения и возможность рециркуляции основных ресурсов (вода, кислоты). Рассмотрен вариант создания временного хвостохранилища и возможность частичного использования отходов путём доставки железнодорожным транспортом на предприятия, которые специализируются на производстве строительных материалов.

Ключевые слова: удоканская медь, Удоканское месторождение меди, серебро, рудоподготовка, флотация, роллер-пресс, флотореагент, гидromеталлургия, атмосферное выщелачивание, хвосты обогащения

Для цитирования: Технология обогащения меди из руды Удоканского месторождения с возможностью извлечения благородных металлов / Е.Е. Алексеев, Е.А. Якуньков, О.О. Сиверин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т. 23, № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/met230301

THE TECHNOLOGY OF COPPER ENRICHMENT FROM THE ORE OF THE UDOKAN DEPOSIT WITH THE POSSIBILITY OF EXTRACTING PRECIOUS METALS

E.E. Alekseyev, yegoralekseevgenyevich@gmail.com

E.A. Yakunkov, eyakunkov@mail.ru

O.O. Siverin, siverinoo@susu.ru

D.Ya. Bakhmanov, dbaxmanov@mail.ru

A.V. Kutergin, kutergin.2014@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. In 2023, Udokan Copper LLC completed the construction of the first stage of the Mining and Metallurgical Combine (MMC) and intends to build the second stage. The planned annual productivity is 40 million tons of processed ore and 400 thousand tons of cathode copper. In the conditions of a difficult economic and geopolitical situation, the company faces the goal of constructing the second stage of the MMC with a high share of domestic technologies and equipment. This article describes technologies for the enrichment of copper from the ore of the Udokan deposit with the use of roller presses instead of semi-self-grinding mills used at the first stage of the MMC, and atmospheric leaching of copper with subsequent extraction/reextraction and electrolysis. The possibility of obtaining silver from leaching cake by cyanidation with subsequent sorption/adsorption is described. Eventually, the company will be able to produce sulfide concentrate, cathode copper that meets the requirements of the London Stock Exchange (LME) in chemical composition, and silver. This production can be carried out with the use of up to 85 % of domestic equipment at the ore preparation and flotation workshops and up to 80 % at the hydrometallurgical workshop. Flotation reagents capable of fully replacing foreign analogues are proposed. The presented technologies will increase the extraction of copper from ore by 1.2–1.5 %. Options for processing enrichment tailings and the possibility of recycling basic resources (water, acids) were also considered. Taking into account the specifics of the MMC's location, the issue of tailings disposal remains open. A variant of creating a temporary tailings storage facility with the possibility of partial loading of tailings into wagons for shipment to enterprises specializing in the production of building materials is proposed.

Keywords: Udokan copper, Udokan copper deposit, silver, ore preparation, flotation, roller press, flotation agent, hydrometallurgy, atmospheric leaching, enrichment tailings

For citation: Alekseyev E.E., Yakunkov E.A., Siverin O.O., Bahmanov D.Ya., Kutergin A.V. The technology of copper enrichment from the ore of the Udokan deposit with the possibility of extracting precious metals. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2023;23(3):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230301

Введение

Компания ООО «Удоканская медь» (Забайкальский край) занимается разработкой крупнейшего в России Удоканского месторождения меди [1]. В 2023 г. предприятие завершило строительство первой очереди горно-металлургического комбината (ГМК) и намерена возвести вторую очередь. Планируемая ежегодная производительность при эксплуатации двух очередей ГМК – 40 млн т переработанной руды и 400 тыс. т катодной меди.

С экономической точки зрения расширение производства может быть оправдано. В ближайшие 10 лет будет наблюдаться рост потребления меди, но из-за снижения темпов производства, а также снижения появления

новых проектов по разработкам новых медных месторождений предложение не будет полноценно покрывать спрос на мировом рынке [2]. Для России реализация проектов по освоению месторождения меди позволит укрепить свой суверенитет в сфере металлургии тяжелых цветных металлов. Вместе с этим активная фаза строительства первой очереди ГМК пришлось на время сложной экономической и геополитической ситуаций. Из-за этих факторов велика вероятность снижения в обозримом будущем производительности при эксплуатации цехов за счет доминирования на предприятии зарубежного оборудования и использования зарубежных реагентов. Поэтому при проектировании и строительст-

ве второй очереди ГМК требуется прежде всего отдать предпочтение отечественным технологиям.

Имеет место и точка зрения, что расширение производства способно привести к катастрофическим последствиям в будущем, ссылаясь на негативный опыт реализации промышленных проектов в данном регионе [3]. Учитывая, что в проект разработки Удоканского месторождения меди уже вложено 2,9 млрд долларов, консервация и переориентирование на другие месторождения не представляется возможным.

Также следует учитывать возможность извлечения благородных металлов из руды. При условии рентабельности подобного внедрения предприятие может выпускать помимо катодной меди класса А по Лондонской бирже (LME) и медного концентрата новую про-

дукцию в виде благородного металла высокого качества.

Минералогический и химический состав руды Удоканского месторождения

Основной тип руды Удоканского месторождения – халькозин-борнитовый. Минералогический и химический составы руды представлены в табл. 1 и 2.

Главная особенность руды Удоканского месторождения от других медных месторождений – относительно большая доля содержания меди в руде – до 2–3 %; наличие в руде всех типов минералов: сульфидные, окисленные и смешанные. Причем на неглубоком залегании преобладают окисленные и смешанные минералы и при увеличении глубины залегания концентрация данных минералов

Таблица 1
Минералогический состав руды Удоканского месторождения
(тип халькозин-борнитовый)

Table 1
The mineralogical composition of the ore of the Udokan deposit
(chalcocite-bornite type)

Минерал	Масс. доля, %
Кварц	47,7
Полевые шпаты	36
Кальцит	5
Мусковит	5,5
Халькозин, борнит, ковеллин	1,5
Халькопирит	0,1
Хризоколла, малахит, брошантит	0,3
Куприт, азурит, анлерит	0,3
Fe-содержащие минералы	2,6
Акцессорные минералы	≈ 1

Таблица 2
Химический состав руды Удоканского месторождения
(тип халькозин-борнитовый)

Table 2
The chemical composition of the ore of the Udokan deposit
(chalcocite-bornite type)

Химический элемент	Масс. доля, %
Медь	1,45
Кремний	34,81
Сера	0,46
Железо	1,96
Кислород	48,9
Алюминий	4,8
Натрий	1,62
Калий	2,93
Золото	$5 \cdot 10^{-6}$
Серебро	$8 \cdot 10^{-4}$

уменьшается и их замещают сульфидные минералы (рис. 1) [4].

Из-за высокого содержания кремнезема и большой доли окисленных минералов меди будет целесообразным переработка руды гидророметаллургическим способом.

Благодаря наличию в руде щелочных и щелочноземельных металлов (калий, натрий, кальций) выщелачивание всего объема руды не представляется возможным из-за высокого расхода серной кислоты.

Также в данной руде отсутствуют (либо имеются в предельно малых количествах) такие вредные примеси, как мышьяк и свинец, также в малых количествах присутствует сера. Все это позволяет обеспечить небольшие

затраты на утилизацию и захоронение данных примесей [5].

Стоит отметить содержание в руде серебра – до 8 г/т руды и золота – до 50 мг/т руды.

Помимо широкого спектра наличия в руде медьсодержащих минералов наблюдаются разные классы зерен и степени раскрытия данных минералов. Гранулометрическая характеристика и распределение по степени раскрытия минералов меди представлены на рис. 2 и 3.

Сульфидные минералы преимущественно обладают крупностью в диапазонах 10–20 мкм и 20–38 мкм, степень раскрытия зерен – 60–100 %, часть зерен может иметь степень раскрытия до 10 %.

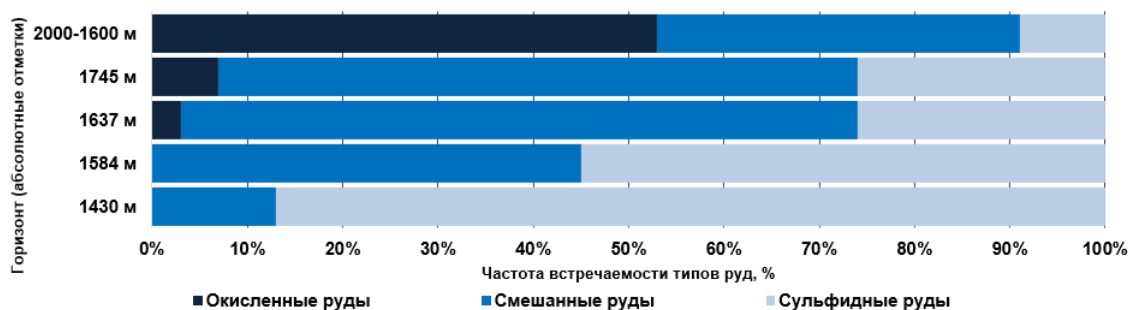


Рис. 1. Размещение типов руд Удоканского месторождения от их гипсометрического положения
Fig. 1. Placement of ore types of the Udokan deposit from their hypsometric position

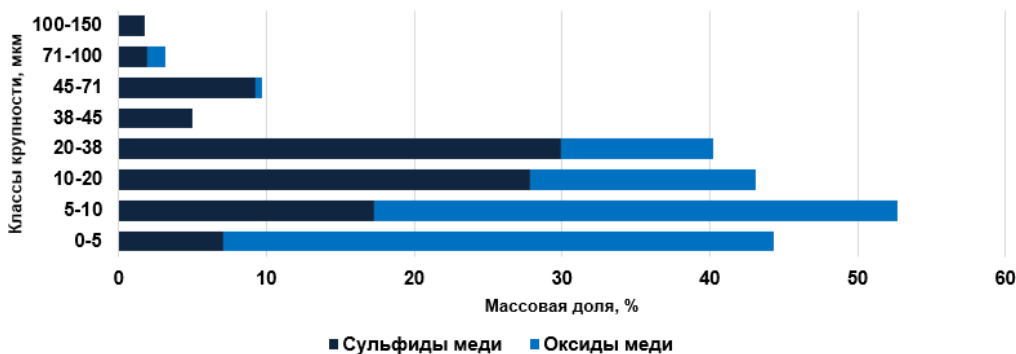


Рис. 2. Гранулометрическая характеристика минералов меди
Fig. 2. Granulometric characteristics of copper minerals

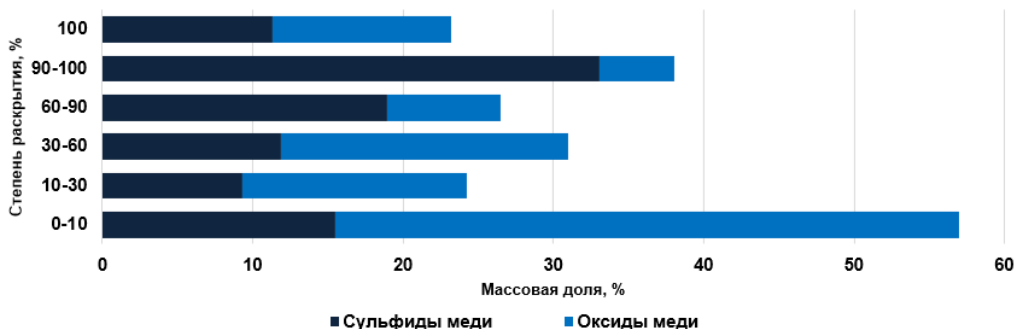


Рис. 3. Распределение минералов меди по степени раскрытия
Fig. 3. Distribution of copper minerals by degree of disclosure

Оксидные минералы преимущественно состоят из мелкодисперсных зерен. Максимальная крупность зерна может достигать до 10 мкм, реже – до 20–30 мкм. Большинство зерен имеют низкую степень раскрытия – до 10 %.

Минералы меди имеют ассоциации с другими минералами в виде сростков (большинство ассоциаций наблюдается с кварцем, полевыми шпатами и слюдой). Окисленным минералам железа и меди свойственно развитие по контурам халькозина и других сульфидных минералов. Все это способствует осложнению извлечения меди и других ценных металлов. Так, при флотационном обогащении уровень неизбежных потерь меди за счет вышеупомянутых факторов может достигать 10–15 %.

Технология рудоподготовки и флотации руды

На рис. 4 представлена схема рудоподготовки и флотации руды Удоканского месторождения. Сначала породу классом –1200 мм ссыпают на рабочую зону гирационной дробилки, где происходит крупное дробление руды. Дробленая руда по конвейеру поступает на склад, откуда перемещается на про-

межуточный бункер. Далее на вибрационном грохоте происходит отсеивание классов ± 40 мм. Класс +40 мм поступает на конусную дробилку для среднего дробления, после чего руда повторно просеивается на грохоте с аналогичным распределением классов крупности. Класс +40 мм попадает на вторую конусную дробилку для более мелкого дробления. Класс –40 мм, а также руда после дробления на второй конусной дробилке по конвейеру поступают на промежуточный склад.

Мелкодробленая руда направляется через бункер питания к роллер-прессу. Валки роллер-пресса настроены для дробления руды классов $\pm 6,3$ мм. Класс +6,3 мм проходит повторное дробление на роллер-прессе, –6,3 мм отправляется на измельчение на шаровой мельнице МШЦ, после чего осуществляется классификация на гидроциклоне. Крупность 80 % класса –0,18 мм отправляется на первую коллективную флотацию. Первичные хвосты доизмельчаются на второй МШЦ и классифицируются на гидроциклоне до более мелкой фракции. Крупность 80 % класса –0,074 мм отправляется на вторую коллективную флотацию.

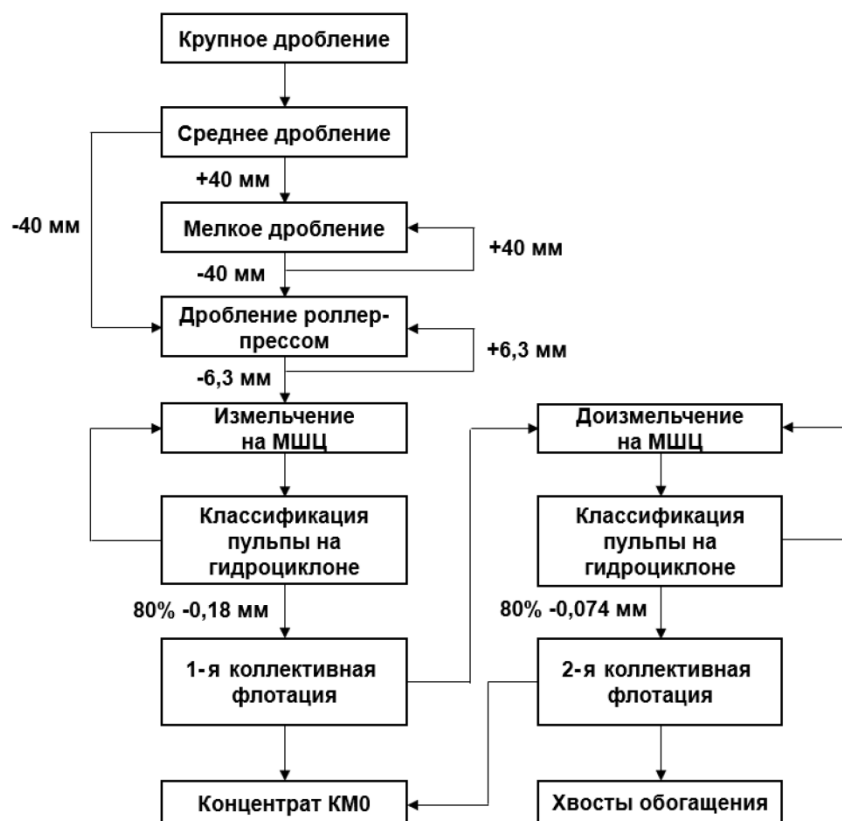


Рис. 4. Схема рудоподготовки и флотации руды Удоканского месторождения
Fig. 4. Diagram of ore preparation and flotation of the ore of the Udokan deposit

После флотации на выходе получается сульфидный концентрат с процентным содержанием меди свыше 45 %, что соответствует марке КМ0 согласно ГОСТ Р 52998–2008 [6].

Основное преимущество технологии состоит в использовании роллер-пресса взамен мельниц полусамоизмельчения ММПС. Одна установка ММПС расходует в пять раз больше электроэнергии, чем роллер пресс. Для ММПС требуются обновление футеровки, а также футеровочная машина для замены футеровки. Но роллер-пресс в отличие от мельницы полусамоизмельчения требует более тщательного контроля со стороны специалистов по обслуживанию оборудования [7].

Внедрение в технологию рудоподготовки роллер-прессов, согласно исследованиям [8, 9], требует на 19 % больше капитальных затрат, чем на внедрение ММПС, операционных затрат – на 22 % меньше.

На сегодняшний день в России существует множество предприятий, способных производить оборудование, необходимое для горнообогатительных производств: конусные дробилки и конвейеры – завод «Тульские машины», г. Тула, Тульская область; МШЦ – АО «Тяжмаш», г. Сызрань, Самарская область; флотомашин и пульпоподъемные камеры – АО «Машзавод Труд», г. Новосибирск, Новосибирская область и т. д. Гирационные дробилки и роллер-прессы отечественные предприятия не производят в требуемых для «Удоканской меди» конфигурациях. Их производство налажено на машиностроительных предприятиях Китая. Таким образом, при возведении цеха рудоподготовки и флотационного обогащения удастся повысить долю отечественного оборудования до 85 %.

Флотационное обогащение руды преимущественно осуществляется при помощи следующих типов реагентов:

- реагенты-собиратели – реагенты, обладающие свойствами гидрофобизации минеральной поверхности пульпы, увеличения скорости и прочности прилипания частиц к пузырькам воздуха. На горно-обогатительных комбинатах чаще всего применяются сульфгидрильные собиратели (ксантогенаты и дитиофосфаты);

- реагенты-пенообразователи – реагенты, позволяющие создавать пену на поверхности пульпы;

- реагенты-регуляторы – реагенты, используемые для регулирования действия со-

бирателей на поверхность минералов. Регуляторы классифицируются на депрессоры, активаторы и регуляторы среды [10].

Основной вопрос для горно-обогатительных комбинатов России (в частности, для Удоканского ГМК) состоит в том, какие отечественные флотореагенты могут полноценно заменить и, возможно, превзойти зарубежные флотореагенты. Проблемой было импортозамещение аэрофлотов и вспенивателей. Так, вместе с бутиловым ксантогенатом калия, который производится в России, применялся аэрофлот «Аэрофин 3418х» для лучшей селективности флотации. Метилизобутилкарбинол во многом превосходил по свойствам отечественные вспениватели (Т66, Т88, Т92).

На сегодняшний день существуют следующие потенциальные разработки флотореагентов от отечественных производителей и ученых:

1. ТАФ-7Ж – дитиофосфат, производимый на предприятии ООО «НПП Квалитет» (г. Люберцы, Московская область). По селективным свойствам он аналогичен зарубежным аэрофлотам. В комбинации с 150 г ксантогената на 1 т руды расход данного реагента составляет 35 г.

2. ФРИМ-2ПМ – пенообразователь, аналогичным свойствам метилизобутилкарбинола. Данный флотореагент производится фирмой ЗАО «Квадрат плюс» (г. Тольятти, Самарская область).

3. Pflow-3 – флотореагент, разработанный компанией ООО «ИХТЦ» (г. Томск, Томская область). Он представляет собой композиционный материал, сочетающий свойства сильного собирателя и пенообразователя для сульфидных минералов. При его использовании возможно сокращение расхода ксантогената на 25–50 %, а пенообразователя – в 2 раза. В 2016–2017 гг. реагент прошел испытания на дочернем предприятии ОАО «УГМК» – АО «Святогор» (г. Красногорск, Свердловская область), где осуществляется переработка медно-цинковой руды. Результаты показали повышение извлечения меди из руды на 1,09 % [11].

Поскольку флотации подвержены как сульфидные, так и оксидные и смешанные минералы меди, на начальном этапе требуется произвести сульфидизацию пульпы для образования сульфидной пленки на оксидных и смешанных минералах. В качестве сульфидизатора применяется сульфид натрия.

Благодаря технологии обогащения руды Удоканского месторождения с использованием роллер-прессов и предложенных отечественных флотореагентов процент извлечения меди может возрасти до 1,2–1,5 %. В случае с благородными металлами при коллективной флотации удастся извлечь до 80–85 % серебра из руды.

Получение меди и благородных металлов гидрометаллургическим способом

Технология, позволяющая производить катодную медь, дополнительно позволяет извлекать из кека выщелачивания меди благородные металлы. С учетом содержания золота и серебра в Удоканской руде, на наш взгляд, более рентабельным станет возможность извлечения серебра.

Схема технологических операций производства катодной меди и серебра (рис. 5) – реверс-инжиниринг процесса Альбион с некоторыми модификациями [12–14]. В основном данную технологию используют на золотодобывающих фабриках. В 2017 г. его модификацию для производства катодной

меди внедрили на медеплавильном заводе в Замбии [15].

Полученный сульфидный концентрат измельчают на бисерных мельницах до крупности 80 % класса –0,012 мкм. Затем измельченный концентрат отправляют на атмосферное выщелачивание. В чаны с измельченным концентратом добавляют раствор 9-водного сульфата железа (III). Основным его преимуществом является образование на выходе элементарной серы, в то время как при использовании серной кислоты на выходе образуется сернистый газ, вредный для окружающей среды. Основными продуктами реакций будут сульфат меди (II) и сульфат железа (II). Пирит, содержащийся в медном концентрате, также подвержен выщелачиванию с образованием сульфата железа (II) и серной кислоты. Двухвалентное железо возможно регенерировать в трехвалентное путем введения в пульпу газообразного кислорода, что позволит сэкономить на дорогом реагенте. В конечном итоге от железа избавляются путем осаждения железа в виде гетита известковым молоком. После удаления железа его остаточное содержание допустимо в диапазоне 8–20 г/л. Про-

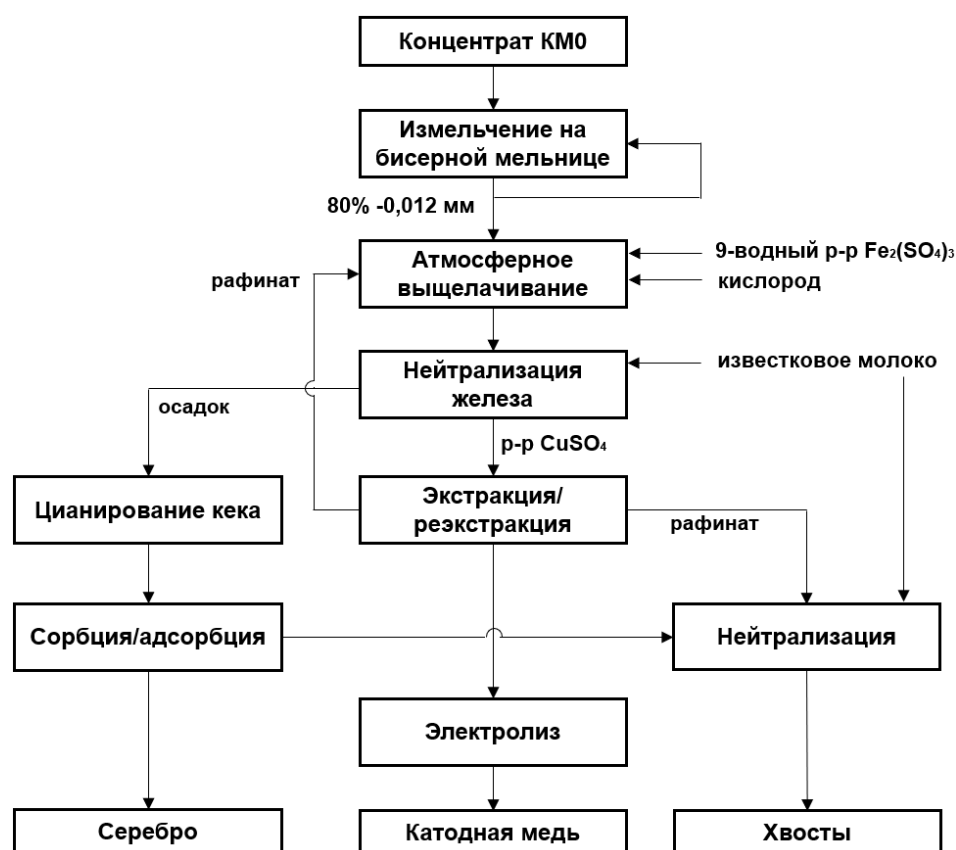


Рис. 5. Схема технологии получения катодной меди и серебра
Fig. 5. Diagram of technology for obtaining cathode copper and silver

гнозируемые потери меди с гетитовым осадком – 1–3 %. Кек выщелачивания отправляется на цианирование и сорбцию/адсорбцию для получения металлического серебра по ГОСТ 6836–2002 [16], а сульфат меди (II) – экстракцию/режэкстракцию. Далее раствор подвергают электролизу, тем самым получая катодную медь М006 ГОСТ 859–2014 (соответствует классу А по LME) [17].

В случае с гидрометаллургическим производством возможно внедрение до 80 % отечественного оборудования.

Рациональное использование ресурсов и отходов производства

Основными проблемами любых горно-металлургических комплексов являются: вопрос высокого расхода водных ресурсов и вопрос утилизации хвостов обогащения. На практике предприятия пропускают хвосты на обезвоживание через сгустители, осуществляя возврат до 50 % воды на цех рудоподготовки и до 80 % на гидрометаллургический цех. В случае с хвостами обогащения намного сложнее. Поскольку хвосты являются отходами V класса опасности, то существуют разные способы их утилизации [18].

- Хранение отходов в хвостохранилища – самый распространенный способ утилизации отходов. Данный вариант несет высокие капитальные и операционные затраты. Помимо этого, существуют риски прорыва оболочки хранилища, что может привести к утечке тяжелых металлов и остаточных реагентов. Для региона с высокой сейсмической активностью данный недостаток становится еще весомее.

- Рекультивация заброшенных карьеров – потенциальный вариант по утилизации отходов. Ярким примером является подача хвостов обогащения от Томинского ГОКа (дочернее предприятие РМК, с. Томино, Челябинская область) по трубам при помощи насосного оборудования в сторону Коркинского угольного разреза [19]. Отходы проходят путь длиной 12 км круглый год. Однако на севере Забайкальского края практически нет заброшенных рудников и карьеров, куда «Удоканская медь» могла бы «складировать» отходы производства, что делает данный способ утилизации нерентабельным.

- Возможность отправления хвостов на предприятия по производству строительных материалов – одно из перспективных направлений по утилизации отходов. В случае с Удоканским ГМК возникает аналогичная проблема, что и с предыдущим вариантом, – большая удаленность от предприятий, специализирующихся в производстве строительных материалов, что вызовет большие экономические издержки на логистические операции. Вместе с этим будет расти нагрузка на Байкало-Амурскую магистраль, что может еще больше осложнить доставку пустой породы.

Таким образом, в ближайшие годы «Удоканской меди» предстоит серьезная работа по проработке способа утилизации хвостов. Как один из способов решения данной задачи, следует соорудить временный склад хвостов с возможностью частичной загрузки содержимого в железнодорожные вагоны.

Согласно рис. 5 после проведения экстракции/режэкстракции раствора сульфата меди (II) образуется рафинат, который можно вернуть на операцию атмосферного выщелачивания, а его избыток нейтрализуется. Отработанный электролит с операции электролиза можно использовать повторно путем обеднения раствора либо восстановить кислоту и осуществить возврат на операцию атмосферного выщелачивания [20].

Заключение

Благодаря представленным в статье вариантам технологий по рудоподготовке, флотационному обогащению и гидрометаллургии компания «Удоканская медь», на наш взгляд, сможет не только увеличить объемы переработки руды и производства катодной меди, но и получит возможность выпускать новую продукцию – серебро. Производство второй очереди возможно осуществить с использованием до 85 % отечественного оборудования на рудоподготовительном и флотационном цехах и до 80 % на гидрометаллургическом цехе. Реагенты, применяющиеся при флотационном обогащении, не уступают зарубежным аналогам. С учетом местоположения Удоканского месторождения меди и ГМК открытым остается вопрос утилизации хвостов обогащения, который в ближайшие несколько лет предприятию предстоит решить.

Список литературы

1. Удоканская медь. URL: <https://udokancopper.ru/?ysclid=lksf3as4n3548741770> (дата обращения: 01.06.2023).
2. Медь: состояние отрасли и бенефициары. URL: <https://gazprombank.investments/blog/economics/copper/> (дата обращения: 03.06.2023).
3. Салихов В.С. Об освоении Удоканского месторождения меди (Забайкалье) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 1. С. 145–149.
4. Зиновьев Ю.И. Закономерности пространственного размещения окисленных руд Удоканского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 12. С. 180–185.
5. Сенченко А.Е., Куликов Ю.В., Курчевская Е.М. Изучение вещественного состава руд Удоканского месторождения с применением современных методов технологической минералогии // Цветные металлы. 2017. № 10. С. 25–34. DOI: 10.17580/tsm.2017.10.03
6. ГОСТ Р 52998–2008. Концентрат медный. Технические условия. Введ. 2010-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 8 с.
7. Сенченко А.Е., Куликов Ю.В. Сравнение технологии рудоподготовки с использованием мельницы полусамодельчения и роллер-пресса для руд Удоканского месторождения меди // Цветные металлы. 2017. № 10. С. 49–56. DOI: 10.17580/tsm.2017.10.05
8. Rosario P.P., Drozdiak J.A., Tse. W. Economic and operational assessment of a non-conventional HPGR circuit // IMPC XXVIII Congress 2016. 2016.
9. Van der Meer F. Comparison of HPGR (Roller Press) and SAG mill grinding circuits. Compilation of Selected Project Data // Cologne 2016. 2016.
10. Родина Т.А. Флотационные реагенты: учебное пособие для самостоятельной работы по органической химии. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2015. 36 с.
11. Новые технологии для горнорудного комплекса: как извлечь больше металлов, расходуя меньше реагентов и денег. URL: <https://ect-center.com/blog/new-tehnologii?ysclid=lkseub6tzv12379589> (дата обращения: 16.06.2023).
12. Васильева А.А. Анализ возможности применения гидromеталлургических методов с целью улучшения переработки медных концентратов / А.А. Васильева, А.Я. Бодуэн, Р.Е. Васильев // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 320–335. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-2-320-335
13. First Commercialisation of the Albion ProcessTM for Copper / D. Voigt, D. Littleford, G. Stieper, M. Hourn. 2019. P. 1–12. URL: <https://www.glencoretechnology.com/rest/api/v1/documents/5ac757b950bc757ee35cc9ec62b58cf6/First+Commercialisation+of+the+Albion+Process+for+Copper.pdf> (дата обращения: 13.06.2023).
14. Технология Альбион для упорных медных концентратов. URL: <https://www.coreresources.com.au/wp-content/uploads/2015/09/Технология-Альбион-для-упорных-медных-концентратов.pdf> (дата обращения: 14.06.2023).
15. Сенченко А.Е., Куликов Ю.В., Аксенов А.В. Технологические особенности руд Удоканского месторождения меди, определяющие рациональную схему переработки, и перспективные направления совершенствования технологии // Цветные металлы. 2017. № 10. С. 35–47. DOI: 10.17580/tsm.2017.10.04
16. ГОСТ 6836–2002. Серебро и сплавы на его основе. Марки. Введ. 2003-07-01. М.: Стандартинформ, 2006. 7 с.
17. ГОСТ 859–2014. Медь. Марки. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2015. 9 с.
18. Об утверждении критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду: приказ М-ва природы Рос. Федерации от 4 дек. 2014 г. № 536 // Техэксперт [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420240163?ysclid=lkti15i143103596917> (дата обращения: 22.06.2023).
19. Коркинский разрез в Челябинской области, каким стал сейчас. URL: <https://ura.news/news/1052659982?ysclid=lktnс8ug46539431168> (дата обращения: 28.06.2023).
20. ИТС 3–2019. Производство меди. Введ. 01.03.2020. М.: Бюро НДТ, 2019. 323 с.

References

1. *Udokanskaya med'* [Udokan copper]. (In Russ.) Available at: <https://udokancopper.ru/?ysclid=lksf3as4n3548741770> (accessed 01.06.2023).
2. *Med': sostoyanie otrasli i beneficiary* [Copper: the state of the industry and beneficiaries]. (In Russ.) Available at: <https://gazprombank.investments/blog/economics/copper/> (accessed 03.06.2023).
3. Salikhov V.S. To the problem of the Udokan copper deposit development (Transbaikalia). *Transbaikal State University Journal*. 2022;28(1):145–149. (In Russ.)
4. Zinovyev Yu.I. [Regularities of spatial placement of oxidized ores of the Udokan deposit]. *Mining informational and analytical bulletin*. 2007;12:180–185. (In Russ.)
5. Senchenko A.E., Kulikov Yu.V., Kurchevskaya E.M. [Investigation of the material composition of udokan copper deposit ores using the modern methods of process mineralogy]. *Tsvetnye Metally*. 2017;10:25–35. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2017.10.03
6. *GOST R 52998–2008*. [Copper concentrate. Technical conditions]. Introduction: 2010-01-01. Moscow: Standartinform; 2008. 8 p. (In Russ.)
7. Senchenko A.E., Kulikov Yu.V. [Comparison of ore comminution technologies using SAG mill and roller-press for Udokan copper deposit ores]. *Tsvetnye Metally*. 2017;10:49–56. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2017.10.05
8. Rosario P.P., Drozdak J.A., Tse. W. Economic and operational assessment of a non-conventional HPGR circuit. *IMPC XXVIII Congress 2016*. 2016.
9. Van der Meer F. Comparison of HPGR (Roller Press) and SAG mill grinding circuits. Compilation of Selected Project Data // *Cologne 2016*. 2016.
10. Rodina T.A. *Flotatsyonnye reagenty: uchebnoe posobie dlya samostoyatel'noy raboty po organicheskoy khimii* [Flotation reagents: a textbook for independent work in organic chemistry]. Blagoveshensk: Amur State University Publ.; 2015. 36 p. (In Russ.)
11. *Novye tekhnologii dlya gornorudnogo kompleksa: kak izvlech' bol'she metallov, raskhoduya men'she reagentov i deneg* [New technologies for the mining complex: how to extract more metals, spending less reagents and money]. (In Russ.) Available at: <https://ect-center.com/blog/new-tehnologii?ysclid=lkseub6tzv12379589> (accessed 16.06.2023).
12. Vasilieva A.A., Bodueb A.Ya., Vasiliev R.E. The feasibility of hydrometallurgical methods for enhancing the processing of copper concentrates. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):320–335. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2022-2-320-335
13. Voigt D., Littleford D., Stieper G., Hourn M. First Commercialisation of the Albion Process™ for Copper. 2019. P. 1–12. Available at: <https://www.glencoretechnology.com/rest/api/v1/documents/5ac757b950bc757ee35cc9ec62b58cf6/First+Commercialisation+of+the+Albion+Process+for+Copper.pdf> (accessed 13.06.2023).
14. *Tekhnologiya Albion dlya upornykh mednykh kontsentratov* [Albion technology for resistant copper concentrates]. (In Russ.) Available at: <https://www.coreresources.com.au/wp-content/uploads/2015/09/Технология-Альбион-для-упорных-медных-концентратов.pdf> (accessed 14.06.2023).
15. Senchenko A.E., Kulikov Yu.V., Aksenov A.V. [Process characteristics of Udokan copper deposit ores, defining the efficient processing flowsheet and prospective ways of the process improvement]. *Tsvetnye Metally*. 2017;10:35–48. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2017.10.04
16. *GOST 6836–2002*. [Silver and silver base alloys. Marks]. Introduction: 2003-07-01. Moscow: Standartinform; 2006. 7 p. (In Russ.)
17. *GOST 859–2014*. [Copper. Grades]. Introduction: 2015-07-01. Moscow: Standartinform; 2015. 9 p. (In Russ.)
18. *Ob utverzhdeniyi kriteriev otneseniya otkhodov k I–V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdeystviya na okruzhayushuyu sredu: prikaz Ministerstva prirody Rossiyskoy Federatsii ot 4 dekabrya 2014 goda No. 536* [On approval of criteria for assigning waste to hazard classes I–V according to the degree of negative impact on the environment: order of the Ministry of Nature of the Russian Federation No. 536 of December 4, 2014]. *Tehekspert [site]*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420240163?ysclid=lkti15i143103596917> (accessed 22.06.2023).
19. *Korkinskiy razrez v Chelyabinskoy oblasti, kakim stal seychas* [The Korkinsky section in the Chelyabinsk region, what it has become now]. (In Russ.) Available at: <https://ura.news/news/1052659982?ysclid=lktn8ug46539431168> (accessed 28.06.2023).

20. *ITS 3-2019*. [Copper production]. Introduction: 01.03.2020. Moscow: Byuro NDT; 2019. 323 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Алексеев Егор Евгеньевич, студент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; yegoralekseevevgenyevich@gmail.com.

Якунков Егор Александрович, студент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; eyakunkov@mail.ru.

Сиверин Олег Олегович, старший преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; siverinoo@susu.ru.

Бахманов Данил Янович, студент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; dbaxmanov@mail.ru.

Кутергин Алексей Владимирович, студент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kutergin.2014@mail.ru.

Information about the authors

Egor E. Alekseyev, Student of the Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; yegoralekseevevgenyevich@gmail.com.

Egor A. Yakunkov, Student of the Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; eyakunkov@mail.ru.

Oleg O. Siverin, Senior Lecturer of the Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; siverinoo@susu.ru.

Danil Ya. Bakhmanov, Student of the Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dbaxmanov@mail.ru.

Aleksey V. Kutergin, Student of the Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kutergin.2014@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 30.04.2023

The article was submitted 30.04.2023