

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНЫХ РУД (ОБЗОР)

© 2021 г. Т.Н. Александрова¹, А.В. Орлова¹, В.А. Таранов²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

² АО «Механообр Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 10.09.20 г., доработана 25.01.21 г., подписана в печать 28.01.21 г.

Аннотация: Проведен анализ технологических схем переработки сульфидных и окисленных медных руд, реагентных режимов, технологического оборудования, показателей флотационного обогащения на ряде отечественных и зарубежных обогатительных фабрик и производств. На рудоподготовительном переделе в первой стадии измельчения широко применяются мельницы само- и полусамозмельчения, что позволяет исключить среднее и мелкое дробление. Альтернативным вариантом является использование измельчающих валков высокого давления, позволяющих сократить электроэнергию по сравнению с само- и полусамозмельчением. Отмечен рост применения большеобъемного и высокопроизводительного рудоподготовительного, флотационного оборудования для поддержания качества и количества производимого продукта. На стадии доизмельчения концентрата основной флотации широкое распространение, помимо шаровых мельниц, получили мельницы тонкого и сверхтонкого доизмельчения различных конфигураций. Проведен анализ используемых флотационных реагентов для повышения эффективности процесса разделения, показан отечественный и зарубежный подход к выбору флотационных реагентов. Отмечено, что на зарубежных обогатительных фабриках часто применяют комбинацию, состоящую из основного и дополнительного собирателей. Приведены сведения о флотационных реагентах, используемых при обогащении медных сульфидных и окисленных руд, и их расходах. Рассмотрена комбинированная схема флотационно-гидрометаллургической переработки смешанной медной руды месторождения Удокан. Сделаны выводы о современных тенденциях в переработке медных руд, в том числе в выборе оборудования.

Ключевые слова: медные руды, переработка, технологическая схема, оборудование, рудоподготовка, измельчение, флотация, реагентный режим, обогатительная фабрика, медный концентрат.

Александрова Т.Н. — докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета (199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2).
E-mail: Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru.

Орлова А.В. — аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.
E-mail: orlova-anna2007@yandex.ru.

Таранов В.А. — канд. техн. наук, гл. специалист проект.-констр. отдела АО «Механообр Инжиниринг» (199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 22 линия, 3, корп. 7). E-mail: taranov.vadim@gmail.com.

Для цитирования: Александрова Т.Н., Орлова А.В., Таранов В.А. Современное состояние переработки медных руд (обзор). *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 3. С. 4–14. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-4-14.

Current status in the copper ore processing (review)

T.N. Aleksandrova¹, A.V. Orlova¹, V.A. Taranov²

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

² «Mekhanobr Engineering» JSC, St. Petersburg, Russia

Received 10.09.2020, revised 25.01.2021, accepted for publication 28.01.2021

Abstract: The article provides the analysis of process flows used for sulfide and oxidized copper ore treatment, reagent schemes, process equipment, indicators of flotation concentration at a number of domestic and foreign concentrating mills and plants. Autogenous and semi-autogenous grinding mills are widely used at the ore preparatory processing at the first stage of grinding to eliminate medium and fine crushing stages. An alternative is the use of high pressure grinding rolls that can reduce electricity consumption as compared to autogenous and semi-autogenous grinding. There is an increase in the use of large-volume and high-performance ore-preparation and flotation equipment for maintaining the quality and quantity of the product. In addition to ball mills, fine and ultrafine regrinding mills of various configurations are widely used at the stage of rougher flotation concentrate regrinding. The analysis of flotation reagents used to improve separation process

efficiency was conducted with domestic and foreign approaches to flotation reagent selection shown. It is noted that foreign concentrating mills often use a combination of main and additional collectors. The paper provides the data on flotation reagents used in the copper sulfide and oxidized ore concentration, and their consumption. A combined diagram of flotation-hydrometallurgical processing of mixed copper ore from the Udokan deposit is considered. Conclusions are drawn about current trends in the processing of copper ores including the choice of equipment.

Keywords: copper ores, mineral processing, process flow, equipment, ore preparation, flotation, reagent regime, processing plant, copper concentrate.

Aleksandrova T.N. — Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department of mineral processing, Saint Petersburg Mining University (199106, Russia, St. Petersburg, Vasilievskii Ostrov, 21st Liniya, 2). E-mail: Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru.

Orlova A.V. — postgraduate student at the Department of mineral processing, Saint Petersburg Mining University. E-mail: orlova-anna2007@yandex.ru.

Taranov V.A. — Cand. Sci. (Eng.), chief specialist at the «Mekhanobr Engineering» JSC (199106, Russia, St. Petersburg, Vasilievskii Ostrov, 22nd Liniya, 3, build. 7). E-mail: taranov.vadim@gmail.com.

For citation: Aleksandrova T.N., Orlova A.V., Taranov V.A. Current status in the copper ore processing (review). *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 3. P. 4–14 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-4-14.

Введение

Согласно данным «International Wrought Copper Council», больше всего меди используется в строительстве зданий, производстве оборудования, инфраструктуре. Мировое потребление меди за 2019 г. составило 29440 тыс. т, что на 0,5 % больше по сравнению с 2018 г. По данным «London Metal Exchanges», стоимость 1 т меди в период от начала 2018 г. до конца 2019 г. варьировалась в среднем от 5800 до 7200 долл. [1, 2]. Постоянно растущий спрос на медь способствует появлению новых отраслевых предприятий, реконструкции и расширению существующих производств как в России, так и за рубежом.

Выбор технологии переработки медной руды зависит от ее вещественного состава, т.е. от содержания сульфидов, оксидов, карбонатов, силикатов меди.

Страны-лидеры по переработке медной руды — Чили, Перу, США, Австралия, Китай, Россия, Мексика, Казахстан, Замбия, Конго и др. В 2018 г. на Чили приходилась почти треть мирового производства меди.

В настоящее время в России наибольший объем переработки связан с рудами медно-порфиновых, медистых песчаников и сланцев, медно-колчеданных месторождений. За рубежом перерабатываются в основном руды сульфидных медно-никелевых, медно-колчеданных месторождений, а также руды медистых песчаников и сланцев. Содержание меди в медистых песчаниках и сланцах варьируется от 1 до 6 %, в сульфидных медно-никелевых рудах — от 1,1 до 4,9 %, медно-колчеданных — от 0,1 до 3 %, медно-порфиновых — от 0,4 до 1,2 %.

Вследствие постепенного снижения содержания меди в руде требуется применение современных технологических решений, эффективных реагентных режимов флотации, высокопроизводительного оборудования, комплексных подходов при выборе схемы переработки руды. В данной работе проведен анализ современных тенденций в переработке медных руд на отечественных и зарубежных обогатительных фабриках.

Совершенствование процессов рудоподготовки

В настоящее время на обогатительных фабриках преобладают схемы, в которых на 1-й стадии измельчения используются мельницы само- и полусамомоизмельчения (ПСИ), при этом для руд крупностью 80 % более 200 мм предусматривается дробление в одну стадию. Как правило, первичное дробление организовано в возможной близости к руднику или карьере. Дробленую руду на обогатительную фабрику доставляют в основном с помощью системы ленточных конвейеров и все реже автотранспортом.

Конкурирующим вариантом технологии само-полусамомоизмельчения остается применение измельчающих валков высокого давления (ИВВД). Обычно ИВВД устанавливаются на 3-й стадии дробления вместо мелкого дробления либо при высокой крепости руд на 4-й стадии дробления, что позволяет осуществить разупрочнение руды перед шаровым измельчением. Схема рудоподготовки на фабрике «Metcalf» (США) включает две ста-

дии дробления: крупное в гирационной дробилке и среднее в конусной дробилке фирмы «Metso» (Финляндия) в замкнутом цикле с грохотом до крупности 80 % класса —41 мм. Тонкое дробление проводится в валковом прессе в замкнутом цикле с грохотами, затем выполняется измельчение в шаровой мельнице, работающей в замкнутом цикле с гидроциклонами, до 80 % класса 250 мкм [3].

Процесс полусамоизмельчения является весьма чувствительным к изменению гранулометрического состава и прочностных свойств поступающей руды, что может снижать производительность рудоподготовительного передела. Для решения этой проблемы к общеизвестным операциям, оптимизирующим работу мельниц ПСИ (догрузка шаров и додрабывание гали с последующим возвращением дробленого материала в питание мельницы), применяются современные решения — например, использование отдельной операции дезинтеграции для дробленой гали в шаровой мельнице или ИВВД. На Михеевском горно-обогатительном комбинате (ГОК) образующаяся рудная галля на разгрузке мельницы ПСИ крупностью —65+12 мм после додрабывания в конусной дробилке до 80 % класса —15 мм идет в питание отдельно работающей шаровой мельницы измельчения гали. На обогатительной фабрике Бозшаколь в Казахстане дробленая рудная галля направляется в ИВВД, работающие в замкнутом цикле с грохотом, подрешетный продукт которого поступает в зумпф шаровой мельницы.

Преимущество само-полусамоизмельчения заключается в простоте и надежности схемы при эксплуатации по сравнению с ИВВД. Однако в случае ИВВД снижаются затраты на электроэнергию на 15—30 %.

Основные тенденции в технологии обогащения медных руд

В последнее время отмечается невысокое содержание меди в руде (в Канаде и США в переработку вовлекают руды, содержащие 0,2—0,3 % меди, в России — не менее 0,4 % [4]), что вызвано истощением богатых медных ресурсов. Технологическая схема переработки медной руды разрабатывается для каждой конкретной руды, но имеются общие тенденции в выборе операций, схем, реагентного режима и оборудования. Подходы к переработке медных руд и выбору реагентов изложены в работах [5—7].

Для сульфидных медных руд чаще всего применяют флотационное обогащение по причине хорошей флотуемости большинства сульфидов. Технологическая схема флотации обычно включает основную и несколько перечистных стадий флотации. Для медно-порфириновых сульфидных руд на обогатительной фабрике «Palabora» (ЮАР) производительностью 150 тыс. т руды в сутки используют схему, включающую основную и контрольную флотации с доизмельчением концентрата основной флотации и последующей перечисткой и получением медного концентрата, содержащего 33 % меди при извлечении 80 %.

Похожая схема применяется на фабрике «Josemaria» (Аргентина) с производительностью 50 тыс. т руды в сутки, за исключением операции контрольной флотации хвостов основной флотации. Содержание меди в исходной руде составляет 0,29 %, в получаемом конечном медном концентрате — 25,1 % при извлечении 86 %.

На Михеевском ГОК производительностью 18 млн т медно-порфириновой руды в год (содержание меди 0,4 %) реализована коллективно-селективная схема с получением медного и молибденового концентратов. Питанием флотации является слив гидроциклона 3-й стадии измельчения 80 % класса —65 мкм. Цикл медной флотации включает основную и контрольную флотации, а также несколько перечистных стадий с доизмельчением концентратов основной и контрольной флотаций и 1 перечистой. В концентрате основной коллективной флотации содержится 4 % меди при ее извлечении 75 %. В получаемом конечном медном концентрате после перечисток содержится не менее 20 % меди при извлечении 85 %.

На фабрике в составе Томинского ГОК (производительность 28 млн т медно-порфириновой руды в год) исходное содержание меди в руде составляет 0,4 %. Питанием основной флотации является слив гидроциклона 3-й стадии измельчения 80 % класса —63 мкм. Цикл флотации включает основную и контрольную флотации, доизмельчение и классификацию концентрата до крупности слива 80 % класса —35 мкм, а также две перечистные операции и перечистную контрольную операцию. Содержание меди в конечном концентрате составляет 20 % при извлечении 85 %.

Минеральный состав медной руды, поступающей на обогатительную фабрику производительностью 65 тыс. т/день проекта «Santo Domingo» (Чили) [8], включает: пирит, халькопирит, борнит,

ковеллин, халькозин, кварц, карбонаты, плагиоклазы, алюмосиликатные глины. Исходное содержание меди в руде — 0,3 %, а в концентрате планируется получать 30 % меди при извлечении 94 %. Проектируемая схема переработки медной руды будет состоять из основной флотации с доизмельчением концентрата основной, 1 перечистой флотации до крупности 80 % класса —34 мкм и последующих перечисток.

Для окисленной медной руды и некоторых сульфидных руд применяют комбинированную флотационно-гидрометаллургическую технологию с получением медного концентрата и медных катодов. Переработка такой руды включает рудоподготовку, флотацию, выщелачивание концентрата, жидкостную экстракцию и электролиз (SX/EW-Solvent Extraction/Electrowinning). В России подобную технологию с флотационным извлечением сульфидов меди из кека выщелачивания планируют использовать на строящемся горно-металлургическом комбинате (ГМК) месторождения Удокан.

Для извлечения медных минералов из забалансовых руд с низким содержанием меди в руде (окисленных, смешанных руд и вторичных сульфидных руд) применяют выщелачивание измельченной руды с последующей переработкой растворов экстракцией и электроэкстракцией. Данная технология используется на ряде крупных медных производств, в том числе: «Escondida» (Чили), «Collahuasi» (Чили), «Buenavista del Cobre» (Мексика), «Morenci» (США) [9].

На горном комбинате «Minera Tres Valles» (Чили) [10] медная руда с карьера и подземного рудника после усреднения на складе дробится в 4 стадии до крупности менее 6 мм, затем смешивается в агломерационной машине с серной кислотой и водой и направляется на кучное выщелачивание, которое проводится в течение 3-х месяцев. Раствор выщелачивания подается на экстракцию с использованием экстрагента, затем проводится электролиз раствора электролита с получением медных катодов.

Направления по совершенствованию режимов флотации

На отечественных обогатительных фабриках в качестве собирателя сульфидных медных минералов чаще всего применяют ксантогенаты и аэрофлоты. Окисленные медные руды обогащаются хуже сульфидных, и в зависимости от степени

окисления на фабриках используют раздельную флотацию сульфидных и окисленных минералов меди. Для повышения эффективности флотации последних их поверхность предварительно сульфидизируют, а затем проводят флотацию с применением сульфгидрильных собирателей (бутиловый и амиловый ксантогенаты). Для флотации окисленных минералов меди также используют оксигидрильные собиратели: жирные кислоты, мыло жирных кислот.

На зарубежных обогатительных фабриках в качестве собирателей наиболее часто применяют дитиофосфаты, PAX (ксантогенат калия амиловый), топливное масло, SIPX (ксантогенат натрия изопропиловый), тионокарбаматы. Так, на канадской фабрике «Higland Valley» и американской «Bagdad» используют реагент PAX в сочетании с топливным маслом, на обогатительной фабрике «El Salvador» в Чили — сочетание PAX и тионокарбамата. На обогатительной фабрике «Minera Candelaria» в Чили основным собирателем служит AP3894 (Solvay), 6—8 г/т, вторичным — Hostafлот-Lib K (Sansil-Clariant), 3—4 г/т. На проектируемой обогатительной фабрике месторождения «Josemaría» (Аргентина) будут применяться сразу три собирателя: PAX, Sascol 95 и Matcol TC-123.

Для повышения эффективности флотации медно-порфировой руды в работе [11] предложены дополнительные собиратели из третичных ацетиленовых спиртов ДК-80 (2-метил-3-бутин-2-ол) в сочетании с AeroMX5152 (15—40 % аллилового эфира амилксантогеновой кислоты) и ВК-901В (диалкилдитиофосфат-диалкилтионокарбамат). Дополнительные собиратели на основе третичных ацетиленовых спиртов ДК-80 и ДМИПЭК эффективно взаимодействуют с поверхностью сульфидных минералов в комплексе с основными собирателями, содержащими в структуре функциональной группы двухвалентную серу.

Исследование [12] показало, что назначением активных по отношению к границе раздела «газ—жидкость» десорбируемых форм ксантогенатов осуществляется снятие ограничений к формированию флотационного контакта. Воздействие десорбируемых форм реагентов на прослойку воды, разделяющую минеральную частицу и пузырек воздуха, усиливается с увеличением длины углеводородного фрагмента ксантогената. В работе [13] дана оценка соотношений активностей физической и химической сорбции реагента на сульфидных минералах. На селективность флотационного

разделения сульфидов оказывает влияние объем жидкости, который удаляется десорбируемой физической и недесорбируемой химической формами сорбции реагента.

Согласно лабораторным исследованиям в ИПКОН РАН (г. Москва), новые собиратели класса дитиокарбаматов, дитиазинов и дитиофосфинатов (ОПДТК, ДЭДТКм, МТХ и ДИФ) повышают качество концентратов по содержанию золота более чем в 1,5 раза и увеличивают извлечение золота более чем на 1,5–5,0 % при обогащении труднообогатимого сырья [14]. Эти собиратели могут быть также использованы при флотации золото-содержащей медистой руды.

Апробация в лаборатории «Норильского никеля» нового вида флотационных реагентов — термоморфных полимеров — с функциональными группами дитиофосфината, тиамина и тиосемикарбазида показала прирост извлечения платины на 12–15 %, палладия — на 3–4 %, меди и никеля — на 4–6 % из богатой данными элементами руды [14].

Для создания флотационной пены применяют терпиниол, ОПСБ (окись пропилена — спирт бутиловый), МИБК (метилизобутилкарбинол), Т-80, Dow 250, сосновое масло и др. Часто пенообразователь оказывается слабым для извлечения грубого промежуточного продукта и недостаточно селективным по отношению к тонким флотируемым частицам. Поэтому на обогатительных фабриках используют комплекс пенообразователей.

Для сульфидизации поверхности окисленных медных минералов на отечественных фабриках обычно применяют сернистый натрий (от 100 до 200 г/т руды), реже — гидросульфид натрия. На зарубежных фабриках в качестве сульфидизатора используют соли сероводородной кислоты (от 10 до 150 г/т руды).

Роль депрессора при флотации медных минералов наиболее часто выполняют жидкое стекло (80–150 г/т), NaHS, известь, Акремон Д-13, КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза) (50–200 г/т), NaHSO₃. Применение в качестве депрессора пустой породы медно-никелевой руды на мономинеральных фракциях сфалерита гуматного реагента показывает высокую депрессирующую активность. В операциях коллективной флотации и в перечистой операции коллективного концентрата при использовании гуматного реагента повышается извлечение никеля и меди в концентрат с сохранением качества последнего [15].

Одной из важных задач при обогащении мед-

ных руд является удаление пирита, содержащегося в пределах от 10 до 90 % в сульфидных медных рудах. На депрессирование пирита оказывает влияние pH пульпы [16].

Важным фактором, влияющим на селективность процесса флотации медных руд, является водородный показатель (pH). Для регулирования водородного показателя пульпы применяют известь, кальцинированную соду, сернистый натрий, жидкое стекло, серную кислоту, цианид и др. На фабрике «Utah Copper» (США) основную флотацию проводят при pH = 8,5, перечистную — при pH = 9,5, в то время как на фабриках «Pinto Valley», «Mineral Park» и «Bagdad» (США) на основной и перечистой флотациях pH = 11,5 [17].

На строящейся обогатительной фабрике по переработке медных руд месторождения Удокан коллективную флотацию планируют проводить при pH = 9,0–10,5, а сульфидную флотацию меди из кека атмосферного выщелачивания — при pH = 5–6. Для создания и поддержания pH среды будут использовать известковое молоко.

Одной из проблем при флотационном обогащении является присутствие шламов. Тонкие частицы, покрывающие минералы, препятствуют закреплению частиц минералов на воздушных пузырьках. Селективность процесса снижается из-за высокой адсорбционной способности шламов по отношению к реагентам и ионам, содержащимся в пульпе. Одним из путей решения проблем, вызванных шламами, является предварительное обесшламливание с применением флотации в «голодном» режиме, т.е. при очень малых дозах собирателя. Предварительная классификация и дальнейшая раздельная подготовка грубой и тонкой частей измельченной рудной массы также оказывают положительный эффект. Известен способ флокуляции шламов сульфидных минералов гидрофобным полимером — бутадиион-стирольным полимером СК-300Х. Одним из вариантов повышения эффективности переработки руд с большим содержанием тонких частиц является применение колонных флотомашинок с крупными частицами в пульпе для селективного абсорбирования на них шламов [18].

Направления развития обогатительного оборудования

В связи с вовлечением в переработку более бедных и труднообогатимых руд происходит увеличение производительности обогатительных фабрик,

вследствие чего широкое применение находит высокопроизводительное оборудование.

На обогатительных фабриках большой производительности первичное дробление осуществляется в гирационных дробилках. На многих фабриках установлена гирационная дробилка «Superior МКII» компании «Metso (Финляндия)». Недавно эта компания выпустила новую линейку дробилок «Superior МКIII», производительность которых составляет от 5250 до 17000 т/ч. На фабриках небольшой производительности в первой стадии дробления используют щековые дробилки — например, «Nordberg C» фирмы «Metso» (Финляндия) производительностью от 335 до 1435 т/ч.

На фабрике «Metcalf» (США) был успешно введен крупнейший в мировой практике роллер-пресс «HRC3000» производительностью 4928 т/ч для тонкого дробления в замкнутом цикле с грохотами фирмы «Schenck» (Германия) 4×10 м [3].

В операциях полусамозмельчения хорошо зарекомендовали себя мельницы SAG (Outotec, Финляндия). На Томинском ГОК установлены мельницы SAG 11,6×8,2 м с кольцевыми приводами мощностью 23 МВт, на фабрике «Copper Mountain» (Канада) производительностью 40000 т/сут эксплуатируются мельницы SAG 10,4×5,2 м с мощностью двигателя 13,5 МВт.

В настоящее время на обогатительных фабриках чаще используют большеобъемные камеры для основной и контрольной операций флотации. Флотомашин «TankCell» (Outotec, Финляндия) имеют модельный ряд с номинальным объемом камер до 630 м³, у флотомашин «Super Cell» (FLSmidth, Дания) объем камер составляет до 600 м³. Применение флотомашин с объемом камер 630 м³ на стадии основной флотации позволило повысить извлечение на фабрике «Buenavista del Cobre» (BVC) в Северной Мексике более чем на 3 % и увеличить содержание меди в концентрате до 24 %. Во флотомашин с механизмом перемешивания «Float Force» (Outotec, Финляндия) контакт между пузырьками и частицами в зоне сдвига между ротором и статором максимизирован. Контакт крупных частиц с воздушными пузырьками происходит за счет интенсивного и спокойного перемешивания, что позволяет достигнуть максимального извлечения благодаря уменьшению количества «отрывов» частиц от воздушных пузырьков [19]. Флотационный передел на фабрике состоит из двух параллельных секций производительностью соответственно 90 тыс. и 100 тыс. т/сут.

На каждой секции было установлено по одной флотомашине «TankCell e630» (Outotec, Финляндия), и объем основной флотации увеличился с 3043 до 4303 м³.

На проектируемой фабрике в Аргентине производительностью около 25 млн руды в год на операции основной флотации в двух параллельных линиях будет установлено по одной флотационной машине с объемом 630 м³. На перерасчетной флотации также планируется разместить 7 флотомашин с объемом 630 м³. На проектируемой фабрике в Чили производительностью 100 тыс т/сут на стадии основной коллективной флотации будут работать 14 флотомашин (2 ряда по 7 флотомашин) с объемом камеры 600 м³ каждая.

На современных отечественных обогатительных фабриках на стадиях основной и контрольной флотации установлены флотомашин с объемом камер 300 м³ (Михеевский, Томинский ГОК). Флотомашин такого типоразмера обеспечивают извлечение медных минералов около 75 %.

Широкое применение на стадии перерасчетных операций флотации нашли колонные флотомашин, работающие как в сочетании с механическими флотомашин, так и самостоятельно. Их использование позволяет достичь высокого содержания металла в концентрате для частиц размером < 150 мкм [20]. На фабрике «Minera Candelaria» (Чили), на стадии перерасчетной флотации которой работают колонные флотомашин, содержание меди в концентрате составляет около 30 %.

Для доизмельчения концентрата основной флотации все чаще вместо барабанных мельниц стали применяться мельницы тонкого и сверхтонкого измельчения «Vertimill», «Stirred Media Detritor» (Metso, Финляндия), «VXPMill» (FLSmidth, Дания), «HIGmill» (Outotec, Финляндия), имеющие вертикальную компоновку, и горизонтальная мельница «Isamill» (Glencore Technology, Австралия) [21]. Эти мельницы доизмельчения имеют ряд преимуществ по сравнению с барабанными мельницами: сокращение времени измельчения, отсутствие в продукте мельницы засорения железным скрапом, снижение энергоемкости процесса, уменьшение расхода измельчающей среды (в среднем на 30 %), достижение необходимой тонины помола, удобство в обслуживании и др.

Измельчение в мельнице «Isamill», по сравнению с традиционным измельчением в стальной среде, помимо высвобождения минералов, заключенных в тонкой фракции, также оказывает поло-

жительное влияние на извлечение минералов при флотации, способствуя ее ускорению при меньшем расходе реагентов, а также исключая воздействие стальной среды на поверхность минералов. Данное воздействие при измельчении в мельницах со стальной средой можно частично ослабить за счет повышения pH среды, а также путем увеличения подачи реагентов в операциях при флотационном обогащении, но при этом селективность процесса снижается [22].

На фабрике «Josemaria» (Аргентина) на стадии доизмельчения концентрата основной флотации планируют установить вертикальную мельницу с мощностью двигателя 11220 кВт для достижения крупности продукта 80 % –25 мкм. На доизмельчении концентрата основной флотации от 80 до 40 мкм в Грузии работает мельница HIG1100 с мощностью двигателя 1100 кВт. На фабрике «Sossego» (Бразилия) продукт мельницы «Vertimill» имеет крупность 80 % –44 мкм [23]. На Талнахской обогатительной фабрике (г. Норильск) введены в эксплуатацию три вертикальные мельницы «VTM3000» (Metso, Финляндия) с установленной мощностью двигателя 2237 кВт [24].

На многих фабриках на этапах обезвоживания для достижения требуемой влажности получаемого концентрата используют фильтр-прессы. Фильтры такого типа, по сравнению с дисковым керамическим фильтром, наиболее эффективны для фильтрации тонкоизмельченного медного концентрата [25].

Комбинированная схема переработки медной руды

В настоящее время наряду с классическими схемами переработки смешанной медной руды находят применение и комбинированные решения. Так, например, на строящемся ГМК месторождения «Удокан» в Забайкальском крае предполагается использование технологии с получением флотационного коллективного концентрата, который будет поступать на атмосферное выщелачивание и последующую переработку раствора по технологии SX-EW. Отмытый кек атмосферного выщелачивания после нейтрализации планируется направлять на сульфидную флотацию. На рисунке представлены основные операции и потоки материала.

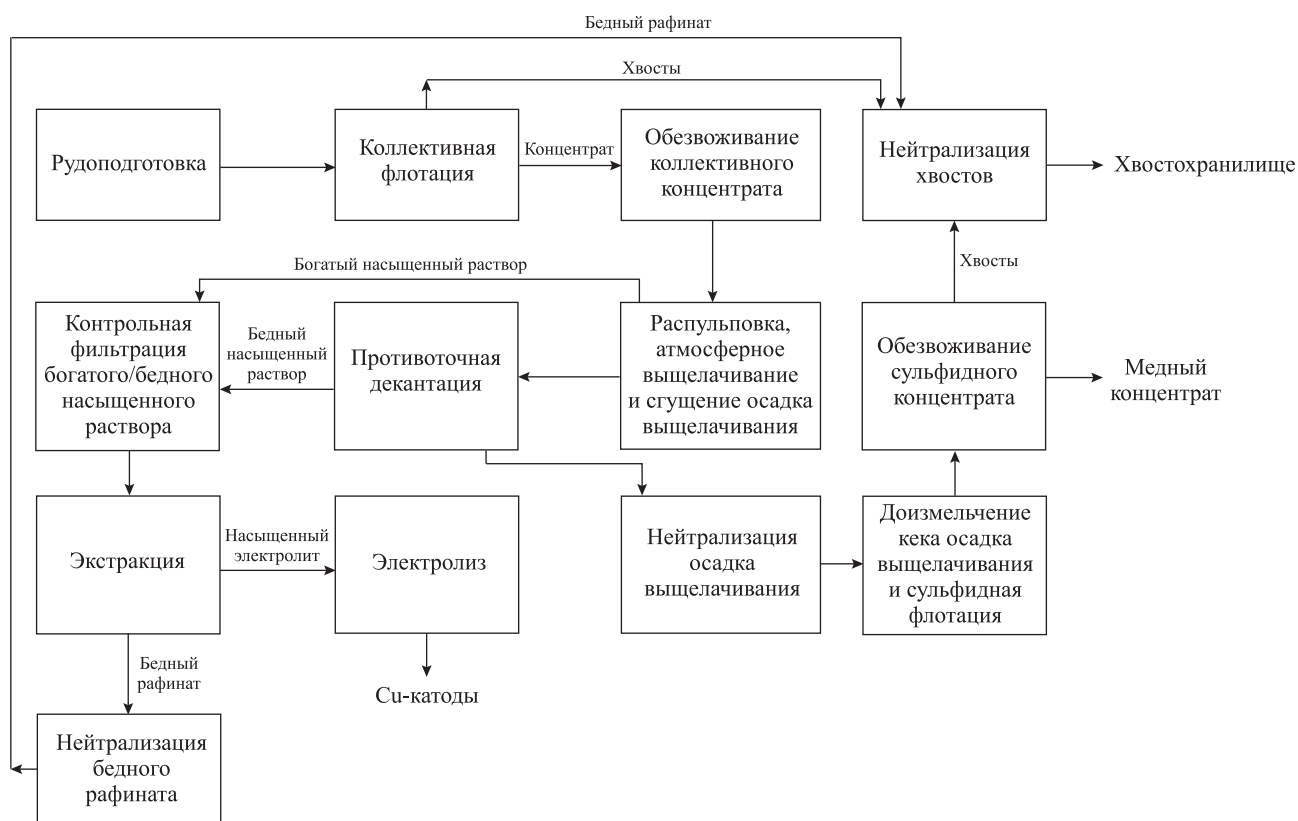
Результатом переработки на ГМК будет получение медных катодов и медного концентрата марки

КМ-0 (содержание меди > 45 %). Одной из главных причин при выборе комбинированной переработки медной руды месторождения Удокан стал ее вещественный состав. Основными носителями меди в руде являются халькозин, борнит и сульфат меди брошантит. Второстепенные рудные минералы представлены сульфидами ковеллином и халькопиритом, сульфатом меди антлеритом, карбонатами малахитом и азуритом. Руда имеет исходное содержание меди 1–2 % и степень окисленности ~60 % [26]. После проведения многочисленных испытаний было принято решение применить комбинированную технологию переработки руды с максимальным извлечением меди в коллективный концентрат (~90 %) при низком ее в нем содержании (~5÷6 % меди) и снижением потери меди с хвостами.

Схема переработки руды включает в себя: дробление, измельчение до крупности 80 % класса –180 мкм, 1-ю коллективную флотацию с доизмельчением хвостов флотации до крупности 80 % класса –74 мкм, 2-ю коллективную флотацию, сгущение и фильтрацию коллективного концентрата, атмосферное сернокислотное выщелачивание сгущенного концентрата коллективной флотации, фильтрацию раствора выщелачивания, экстракцию и реэкстракцию продуктивного раствора выщелачивания с целью подготовки чистого электролита (без примесей), электролиз меди из реэкстракта, нейтрализацию кека атмосферного выщелачивания, его доизмельчение до 80 % класса –25 мкм, основную сульфидную флотацию с двумя перемывками, обезвоживание концентрата сульфидной флотации.

В операции коллективной флотации будут использоваться: в качестве собирателя меди — бутиловый ксантогенат (40–100 г/т), сульфидизатора — сернистый натрий (50–200 г/т), вспенивателя — МИБК (10 г/т). Реагентный режим сульфидной флотации включает: депрессор — жидкое стекло (15–35 г/т), собиратель — бутиловый ксантогенат (5–15 г/т), вспениватель — МИБК (5–10 г/т). В медный концентрат сульфидной флотации планируется извлекать около 88 % меди при ее содержании более 45 %.

Что касается аппаратного оформления обогатительной фабрики ГМК «Удокан», то можно отметить применение большеобъемных камер «TankCell» (Outotec, Финляндия) с объемом камеры 300 м³. На стадии доизмельчения кека атмосферного выщелачивания будут использоваться



Блок-схема переработки медной руды месторождения Удокан

Flow chart of Udokan deposit copper ore processing

бисерные мельницы «HIGmill» (Outotec, Финляндия). Фильтрация коллективного концентрата крупностью 60–100 мкм будет проводиться на пресс-фильтрах «Larox» (Outotec, Финляндия) с площадью фильтрования 1314 м² до влажности 20 %, медного концентрата крупностью 25 мкм с площадью фильтрования 198 м² — до влажности 17 %. Относительно высокие значения влажности вызваны свойствами минералов пустой породы, входящих в состав концентрата.

Заключение

При выборе и оптимизации схемы рудоподготовки медной руды большое внимание отводится технологии измельчения (полусамомоизмельчению/ИВВД). В технологии само-полусамомоизмельчения особый интерес представляет оптимизация работы узла додраблывания гали за счет отдельного измельчения.

На выбор технологической схемы переработки медной руды большое влияние оказывают промышленный тип месторождения и степень

окисленности руды. Для сульфидных руд обычно применяют флотационное обогащение, для окисленных и смешанных — флотационное обогащение совместно с гидрометаллургической переработкой.

При флотации сульфидных руд в большинстве случаев используют бутиловый ксантогенат — как отдельно, так и в сочетании с дитиофосфатами или тионокарбаматами, который в течение продолжительного периода времени применяется в России в качестве основного собирателя медных руд. На зарубежных фабриках получили распространение этиловый ксантогенат и аэрофлоты, которые в России имеют ограниченное использование из-за более высокой стоимости.

В качестве вспенивателя при флотации сульфидных минералов меди применяются сосновое масло, МИБК и крезоловая кислота.

В настоящее время разработка новых флотационных реагентов направлена на селективность их действия, экологическую безопасность и экономичность. В связи с тем, что процесс создания и испытания нового реагента требует больших за-

трат времени и ресурсов, от создания до внедрения реагента в технологический процесс фабрики не-обходим продолжительный период времени. При разработке реагентных режимов на новых обога-тительных фабриках предпочтение отдают прове-ренным временем реагентам.

На обогатительных фабриках все чаще уста-навливают высокопроизводительное рудоподго-товительное оборудование. Отмечен рост исполь-зования большеобъемных флотационных машин с объемом камер от 300 до 630 м³. Предпочтение их малого количества вместо большого числа флото-машин с меньшим объемом камер позволяет сни-зить капитальные и эксплуатационные расходы. На зарубежных обогатительных фабриках на пе-речистных операциях флотации широкое приме-нение нашли колонные флотомашины, которые помимо эффективного разделения частиц крупно-стью менее 150 мкм позволяют сократить площадь установки оборудования за счет своего конструк-тивного исполнения.

Для раскрытия минералов на стадии доизмель-чения используются мельницы «VertiMill» (Met-so, Финляндия), для тонкого измельчения — «IsaMill» (Glencore Technology, Австралия), а также «HIGmill» (Outotec, Финляндия). Данные мель-ницы имеют разную конфигурацию, что делает возможным размещать их на малых площадях, затрачивать меньше энергии для измельчения до необходимого размера зерна по сравнению с бара-банными мельницами.

*Работа выполнена при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 20-55-12002).*

Acknowledgments: *This work was supported
by the Russian Foundation for Basic Research
(project № 20-55-12002).*

Литература/References

1. The IWCC Statistical Bulletin. URL: <http://www.coppercouncil.org/iwcc-statistics-and-data> (accessed: 03.11.2020).
2. LME Copper. URL: <https://www.lme.com/en-GB/ Metals/Non-ferrous/Copper#tabIndex=0> (accessed: 03.11.2020).
3. Баранов В.Ф. Использование зарубежного опыта при разработке варианта реконструкции Жезказганско-го обогатительного комплекса. *Обогащение руд*. 2020. No. 1. С. 54—59.
Baranov V.F. Using foreign experience in developing a variant of reconstruction of the Zhezkazgan comp-lex. *Obogashchenie Rud*. 2020. No. 1. P. 54—59 (In Russ.).
4. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных иско-паемых: Учеб. для вузов. 4-е изд., стер. В 2 т. Т. 2: Технологии обогащения полезных ископаемых. М.: Горная книга, 2017.
Avdokhin V.M. Fundamentals of mineral processing. 4th ed. 2017. Vol. 2. Mineral processing technologies. Moscow: Gornaya kniga, 2017 (In Russ.).
5. Курчуков А.М. Алгоритм управления реагентным ре-жимом флотации медно-никелевых руд на основе оптимизации параметров ионного состава пульпы. *Записки Горн. ин-та*. 2011. Т. 189. С. 292—294.
Kurchukov A.M. The control algorithm reagent conditions of flotation copper-nicel ores on the basis of optimizing the ionic parameters. *Zapiski Gornogo Instituta (J. Mining Inst.)*. 2011. Vol. 189. P. 292—294 (In Russ.).
6. Boduen A.Ya., Ivanov B.S., Ukraintsev I.V. Copper con-centration from sulfide ore: State-of-the art and prospects. *Non-Ferr. Met.* 2015. No. 1. P. 17—20.
7. Иванов Б.С., Бодуэн А.Я., Петров Г.В. Отечественные медно-цинковые колчеданные руды: Проблемы пе-реработки и технологические перспективы. *Обога-щение руд*. 2014. No. 3. С. 7—13.
Ivanov B.S., Boduen A.Ya., Petrov G.V. Russian pyrite copper-zinc ores: Processing problems and technologi- cal prospects. *Obogashchenie Rud*. 2014. No. 3. P. 7—13 (In Russ.).
8. Santo Domingo Technical Report (January 2019). URL: <https://capstonemining.com/operations/santo-domingo/default.aspx> (accessed: 02.11.2020).
9. ICSG Releases the 2019 Directory of Copper and Copper Alloy Fabricators. The International Copper Study Group (ICSG). URL: <http://www.icsg.org/index.php/116-icsg-releases-the-2019-directory-of-copper-and-copper-alloy-fabricators> (accessed: 10.01.2020).
10. Minera Tres Valles. URL: <https://mineratresvalles.com/> (accessed: 28.10.2020).
11. Юшина Т.И., Пурэв Б., Д'Элия Янес К.С., Намуунгэ-рэл Б. Повышение эффективности флотации мед-но-порфиновых руд с применением дополнитель-ных собирателей на основе ацетиленовых спиртов. В сб.: *Проблемы и перспективы эффективной пере-работки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения-2019)*: Матер. Междунар. совещ. (Иркутск, 9—14 сент. 2019 г.). Иркутск: Репроцентр А1, 2019. С. 140—144.
Yushina T.I., Purev B., D'Elia Yanes K.S., Nambuungerel B. Increasing the efficiency of flotation of porphyry copper ores using additional collectors based on acetylene al-

- cohols. In: *Problems and prospects of effective processing of mineral raw materials in the 21st century (Plaksin Readings-2019)*: Proc. Intern. conf. (Irkutsk, 9–14 Sept. 2019). Irkutsk: Reprocentr A1, 2019. P. 140–144 (In Russ.).
12. Кондратьев С.А., Мошкин Н.П., Коновалов И.А. Оценка собирательной способности легко десорбируемых форм ксантогенатов. *Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых*. 2015. No. 4. С. 164–173.
Kondrat'ev S.A., Moshkin N.P., Kononov I.A. Collecting ability of easily desorbed xanthates. *J. Min. Sci.* 2015. Vol. 51. No. 4. P. 830–838.
 13. Кондратьев С.А., Мошкин Н.П., Бурдакова Е.А. Определение оптимального соотношения активностей разных форм сорбции реагента на сульфидных минералах. *Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых*. 2015. No. 5. С. 146–154.
Kondrat'ev S.A., Moshkin N.P., Burdakova E.A. Optimized activity ratio for different types of reagent attachment at sulfide minerals. *J. Min. Sci.* 2015. Vol. 51. No. 5. P. 1021–1028.
 14. Пост-релиз конференции «Флотационные реагенты 2017» URL: <https://chem.ru/nauka-i-tehnologiya/425-post-reliz-konferencii-flotacionnye-reagenty-2017.html> (дата обращения: 10.01.2021).
Post-release of the conference «Flotation reagents 2017». URL: <https://chem.ru/nauka-i-tehnologiya/425-post-reliz-konferencii-flotacionnye-reagenty-2017.html> (accessed: 10.01.2021) (In Russ.).
 15. Усманова Н.Ф., Маркосян С.М., Тимошенко Л.И., Пасюга Д.В. Применение гуматного реагента в качестве депрессора при флотации медно-никелевых руд. В сб.: *Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения-2019)*. Матер. Междунар. совещ. (Иркутск, 9–14 сент. 2019 г.). Иркутск: Репроцентр А1, 2019. С. 164–166.
Usmanova N.F., Markosyan S.M., Timoshenko L.I., Pasyuga D.V. The use of a humate reagent as a depressant in the flotation of copper-nickel ores. In: *Problems and prospects of effective processing of mineral raw materials in the 21st century (Plaksin Readings-2019)*: Proc. Intern. conf. (Irkutsk, 9–14 Sept. 2019). Irkutsk: Reprocentr A1, 2019. P. 164–166 (In Russ.).
 16. Костович М., Лазич П., Вучинич Д., Деушич С., Томанец Р. Факторный план эксперимента селективной флотации халькопирита из сульфидных медных руд. *Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых*. 2015. No. 2. С. 167–176.
Kostovic M., Lazic P., Vucinic D., Deusic S., Tomanec R. Factorial design of selective flotation of chalcopyrite from copper sulfides. *J. Min. Sci.* 2015. Vol. 51. No. 2. P. 380–388.
 17. Zanin M., Lambert H., Du Plessis C.A. Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review. *Miner. Eng.* 2019. No. 143. P. 1–14.
 18. Куенко Л.А., Воронова О.В. Селективная флотация тонковкрапленных карбонатно-флюоритовых руд в условиях повышения дисперсной однородности пульпы. *Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых*. 2014. No. 1. С. 176–182.
Kienko L.A., Voronova O.V. Selective flotation of fine-ingrained carbonate-fluorite ore in pulp of increased dispersion uniformity. *J. Min. Sci.* 2014. Vol. 50. No. 1. P. 176–181.
 19. Самые большие флотомашин в мире позволили увеличить извлечение меди и молибдена в Мексике. OUTOTEC. URL: <https://www.outotec.ru/products-and-services/newsletters/minerva/minerva-vypusk-1-2019/samye-bolshie-flotomashiny-v-mire-pozvolili-uvlechit-izvlechenie-medi-i-molibdena-v-meksike/> (дата обращения: 10.01.2020).
World's largest flotation machines increase copper and molybdenum recovery in Mexico. OUTOTEC. URL: <https://www.outotec.ru/products-and-services/newsletters/minerva/minerva-vypusk-1-2019/samye-bolshie-flotomashiny-v-mire-pozvolili-uvlechit-izvlechenie-medi-i-molibdena-v-meksike/> (accessed: 10.01.2020) (In Russ.).
 20. Колонные флотомашины — максимальное извлечение из тонкоизмельченных минералов. OUTOTEC. URL: <https://www.outotec.ru/products-and-services/newsletters/minerva/minerva-3-2017/flotation-columns-getting-the-most-from-fine-ores/> (дата обращения: 10.01.2020).
Column flotation machines — maximize extraction from fine minerals. OUTOTEC. URL: <https://www.outotec.ru/products-and-services/newsletters/minerva/minerva-3-2017/flotation-columns-getting-the-most-from-fine-ores/> (accessed: 09.01.2020) (In Russ.).
 21. Николаева Н.В., Ромашев А.О., Александрова Т.Н., Фадина А.В. Интенсификация технологий разупрочнения и дезинтеграции полидисперсных минеральных комплексов различного генезиса с использованием мельниц Isamil. *Горн. инф.-анал. бюл.* 2013. No. 10. P. 97–101.
Nikolaeva N.V., Romashev A.O., Aleksandrova T.N., Fadina A.V. Intensification of technologies for weakening and disintegration of polydisperse mineral complexes of different genesis with using mills Isamil. *Gornyi Informatsionno-Analiticheskii Byulleten'*. 2013. No. 10. P. 97–101 (In Russ.).

22. Повышение извлечения при флотации. URL: <https://www.isamill.com/ru/isamill-advantages/Pages/Improved-Flotation-Recovery.aspx> (дата обращения: 10.01.2021).
Increase flotation recovery. URL: <https://www.isamill.com/ru/isamill-advantages/Pages/Improved-Flotation-Recovery.aspx> (accessed: 10.01.2021) (In Russ.).
23. *Bergerman M.G., De RennoMachado L.C., Kronemberger V., Delboni Jr.H.* Copper concentrate regrind at Sossego Plant using vertical mill—An evaluation on the first years of operation: *Proc. XXVI Intern. Miner. Processing Congress (IMPC)* (New Delhi, India, 24—28 Sept. 2012). Paper No. 298. P. 00432—00441.
24. На ТОФ вводятся в эксплуатацию новые вертикальные мельницы. Норникель. URL: <https://www.nornickel.ru/news-and-media/press-releases-and-news/na-tof-vvodyatsya-vekspluatatsiyu-novye-vertikalnye-melnitsy-/?dateStart=1467320400&dateEnd=1469998799&type=news> (дата обращения: 17.04.2020).
New vertical mills are being commissioned at the TOF. NorilskNickel. URL: <https://www.nornickel.ru/news-and-media/press-releases-and-news/na-tof-vvodyatsya-vekspluatatsiyu-novye-vertikalnye-melnitsy-/?dateStart=1467320400&dateEnd=1469998799&type=news> (accessed: 09.01.2020) (In Russ.).
25. *Кожонов А.К., Молмакова М.С., Дуйшонбаев Н.П.* Выявление возможных причин проблем при обезвоживании продуктов флотационного обогащения. *Вестн. МГТУ им. Г.И. Носова*. 2018. Т. 16. No. 3. С. 17—24.
Kozhonov A.K., Molmakova M.S., Duishonbaev N.P. Identifying possible causes of problems in the dewatering of flotation products. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2018. Vol. 16. No. 3. P. 17—24 (In Russ.).
26. *Денисов М.Э., Руднев Б.П., Крылова Л.Н., Кучмина Ю.С.* Технология переработки медной руды Удоканского месторождения с предварительным сернокислотным выщелачиванием. *Горн. инф.-анал. бюл.* 2015. No. 10. С. 100—104.
Denisov M.E., Rudnev B.P., Krylova L.N., Kuchmina Yu.S. Processing technology for Udokan copper ore with sulfuric-acid pre-leaching. *Gornyi Informatsionno-Analiticheskii Bylleten'*. 2015. No. 10. P. 100—104 (In Russ.).