

УДК 622.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ФЛОТОМАШИН СТРУЙНОГО ТИПА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД

Васюнина Н.В.¹, Бурдакова Е.А.^{1,2}, Дружинин К.Е.³, Сысоева Я.С.¹, Иванова И.К.¹

¹ФГАОУ ВО СФУ; ²ИХХТ СО РАН; ³ООО «ИНДАСТ-ПРО»

yanasisoeva2000@yandex.ru

Медно-молибденовые руды являются одним из основных источников производства меди и значительной доли молибдена. Медные минералы в этих рудах представлены чаще всего халькопиритом и халькозином (иногда ковеллином, борнитом), молибден – молибденитом. Основным методом обогащения данного типа руд является флотация ввиду природной флотационной активности минералов.

На обогатительных фабриках перерабатывают медно-молибденовые руды с получением коллективного концентрата, который далее направляют в процесс селекции. Коллективный концентрат содержит порядка 10-30% меди и 0,1-1% молибдена. Основным способом разделения сульфидов молибдена и меди служит пропарка в среде сернистого натрия и последующая флотация молибденита при депрессии медных минералов. Тонина помола в коллективном цикле составляет порядка 50-60% класса – 0,074 мм, далее коллективный концентрат доизмельчают до 70-90% класса – 0,044 мм перед селекцией, а также непосредственно перед перечистками. Доизмельчение черновых коллективных концентратов перед перечистками освежает минеральную поверхность и повышает флотоактивность молибденита и минералов меди, а также способствует

отделению сульфидов от минералов породы.

Известно, что сульфиды цветных металлов чрезвычайно хрупки, что приводит к их переизмельчению. Потери ценных компонентов с тонкими классами остаются одной из главных проблем в современной технологии флотации. При переработке медно-молибденовых руд содержание тонких классов, менее 20 мкм, в хвостах обогащения достигает 20-40 %, и потери металлов с ними составляют до 60% от общих потерь [1].

Исходя из вышесказанного, для флотации тонких классов перспективно рассматривать флотомашину струйной флотации, которые еще называют флотомашинами типа «реактор-сепаратор». Камера флотомашины струйной флотации (СФ) включает в себя три основные зоны: аэратор, зона пульпы в емкости и зона пены в емкости. Аэратор – это основа струйной флотации, в нем происходит интенсивный контакт пузырьков и частиц. Питание подается в аэратор через входное отверстие линзы пульпы, создавая струю высокого давления. Эта струя жидкости захватывает воздух из атмосферы. При удалении воздуха внутри аэратора создается вакуум, в результате чего столб жидкости перемещается в аэраторе вверх. Струя ударяет в столб жидкости, где кинетическая энергия уда-

ра разбивает воздух на мелкие пузырьки, которые сталкиваются с частицами. Очень большая граничная площадь пузырьков и интенсивное перемешивание обеспечивают быстрый контакт частиц и пузырьков воздуха, способствуя высокой несущей способности камеры. В сравнении с машинами традиционной флотации, средний диаметр пузырьков в машинах струйного типа значительно меньше (0,3 мм против 1 мм), за счет чего общая площадь поверхности контакта пузырька-частицы возрастает более чем в 3 раза [2].

Флотационные машины типа «реактор-сепаратор» хорошо зарекомендовали себя на ряде предприятий по переработке полиметаллических медных, медно-молибденовых и других руд цветных металлов. Так, например, флотационные машины Jameson Cell были внедрены на обогатительных фабриках предприятий «Mamut Copper» (Малайзия), «Mount Isa Mines» (Австралия), Kidd Creek (Канада), Maricalum Mining (Филиппины), North Ltd (Австралия), Amalg Syndicate (Австралия), Minera Alumbraera (Аргентина), Lang Xang Minerals Limited (Лаос), Kazakhmys (Казахстан), Vale Inco (Канада), Glencore (Австралия) и др.

Известен опыт установки флотомашин струйного типа на медных рудах Phu Kham в Лаосе (владеет компания Phu Bia Mining Limited), содержащих 0,75% Cu, 0,33 г/т Au, 3,8 г/т Ag. Производительность фабрики составляет 16 млн. т руды в год. Руды характеризуются сложной и изменчивой минералогией (по мере увеличения глубины карьера изменяется соотношение минеральных форм меди – от самородной до окисленных минералов меди, а также вторичных и первичных минералов), высоким

содержанием пирита, с которым также связаны трудности получения приемлемого по качеству медного концентрата с содержанием меди не менее 23 %. Среди основных минералов меди преобладающими являются халькопирит и борнит, нерудные минералы представлены кварцем, слюдой, тальком, также руда содержит каолиновые глины. При использовании технологии коллективной флотации сульфидов меди и благородных металлов в концентрат было установлено, что основные потери меди наблюдаются с грубыми сростками ее минералов с пустой породой, а основные потери золота – с пиритом. С марта 2022 г. для перечистки черного коллективного (Cu-Au) концентрата основной флотации, который предварительно доизмельчается в мельницах Isa Mill, были установлены флотационные машины струйного типа, которые позволили осуществлять перечистку тонкоизмельченного продукта с получением концентрата приемлемого качества. Эффективная работа цикла перечистки позволила повысить общее извлечение меди на фабрике на 0,8% [3-5].

Положительные результаты использования флотомашин струйного типа продемонстрированы в работе [6], где были проведены опытно-промышленные испытания на медно-молибденовых рудах месторождения Andina в Чили (входит в состав компании Codelco). На обогатительной фабрике для коллективной перечистки Cu-Mo концентрата (после измельчения в вертикальных мельницах) использовались флотационные колонны, однако их работа характеризовалась неудовлетворительными результатами относительно извлечения молибдена. Для снижения потерь молибдена с хвостами предлагалось оце-

нить эффективность замены колонных флотомашин на флотомашину типа струйного типа. В результате проведения опытно-промышленных испытаний достигнуты следующие показатели: извлечение меди в концентрат в колонных машинах составляет 50-80%, во флотомашине струйного типа в зависимости от условий их работы - 60-90%; при этом содержание меди в концентрате на первых машинах получено равным 29,7%, на вторых – 28%. Извлечение молибдена для колонных флотомашин находится в пределах 10-25%, для флотомашин струйного типа - 40-80%; содержание молибдена в коллективном концентрате для колонных машин составляет 0,9 %, а для флотомашин струйного типа - 3,0 % (при содержании в питании операции – 0,032% Mo).

Для предварительной оценки возможности установки флотомашин струйного типа по операциям флотации в технологической схеме предприятий компанией Glencore Technology была разработана методика симуляции, имеющая также в иностранной литературе определение «тест разбавления» («dilution cleaning procedure»).

Сущность методики «теста разбавления» - это проведение двух испытаний, одно из которых представляет собой опыт по флотации на механической флотомашине в одну операцию с фракционным съемом пенного продукта, другое – выполняется на аналогичной флотомашине и реагентном режиме флотации, но при этом схема включает три операции (основную, первую и вторую перемешивающие операции). Время отбора пенных фракций в первом тесте - это 0,5; 1; 2,5 и 6 минут (однако оно может быть скорректировано в соответствии с флотуемостью ценного компонента и для

получения четырех концентратов может составлять более 10 минут).

Рекомендуемое содержание твердого при симуляции основных и контрольных операций – 35%, для первой перемешивающей – 25%, для последующей операции – еще на 10% рекомендуемое значение должно быть ниже. Тесты выполняются с использованием в качестве орошающей воды с концентрацией ионогенного пенообразователя 15-20 промилле. Время основной операции определяется визуально исходя из минерализации пены, ее высоты и цветности; время первой перемешивающей и второй регламентируется согласно методике симуляции и составляет 7/8 и 5/8 от продолжительности основной операции флотации. Вторая перемешивающая также осуществляется с дробным съемом пенного продукта. Конечными продуктами первого теста являются четыре концентрата и отвальные хвосты. Конечными продуктами теста симуляции являются также четыре концентрата и три пробы хвостов (богатые хвосты 2 перемешивающей, хвосты 1 перемешивающей, хвосты основной операции). Все продукты первого и второго сравнительных тестов после сушки и разделки направляют на анализ элементного состава, а при необходимости - минерального.

По результатам двух сравнительных опытов строятся кривые обогатимости, по которым делается вывод о необходимой продолжительности флотации и прогнозировать результаты обогащения при установке флотомашин струйного типа.

Второй способ проведения испытаний флотационным методом позволяет воспроизвести условия, при которых эффект повышения технологических показателей на кривых обогатимости

типа «качество-извлечение» достигается при продолжительном нахождении материала в камере флотомашин (с учетом рециркуляции пульпы в машинах струйной флотации), однако при этом в операциях перемешивания удаляются механически вынесенные в концентрат породные частицы. Кроме того, в условиях низкой плотности пульпы и наличия высокоэффективной промывки пены обеспечиваются условия для вторичной концентрации частиц в пенном слое.

Для апробации методики, нами были выполнены исследования на полиметаллических медно-молибденовых рудах, являющихся сырьевой базой одного из крупнейших предприятий Узбекистана.

На обогатительной фабрике переработка комплексных медно-молибденовых руд, содержащих также золото и серебро, осуществляется по комбинированной гравитационно-флотационной технологии с извлечением благородных металлов центробежной концентрацией и флотационным извлечением цветных металлов из хвостов гравитации в коллективный концентрат для последующего разделения. Цикл коллективной флотации предполагает реализацию двух операций – I основной операции, в которой по существу, выделяют из руды «медную головку», а также II основную – для выделения основной массы сульфидов меди и молибдена. Кроме этого, после выделения сульфидов меди и молибдена, предусмотрено выделение пиритного концентрата с последующей его переработкой гидрометаллургическими методами (для увеличения полноты извлечения золота и серебра). Коллективный концентрат подвергают обработке гидросернистым натрием с целью десорбции остаточной концентрации реаген-

тов (поданных в коллективном цикле), далее разделяют используя приемы для флотации молибденита и депрессии минералов меди.

Исходная проба для проведения исследований в кр. -20+0 мм была доведена до крупности -3+0 мм по средствам стадийного дробления, грохочения и перемешивания. Перед дроблением от исходной руды были отобраны штучные образцы для проведения минералогических исследований. После усреднения руды осуществлялся отбор проб для спектрального, химического, масс-спектрального и др. видов лабораторных анализов с целью изучения вещественного состава руды.

Для изучения гранулометрической характеристики руды и распределения ценных компонентов по классам крупности выполнен ситовой анализ на материале крупностью -3+0 мм с определением выхода классов -3+2,5 мм, -2,5+1,4 мм, -1,4+1,0 мм, -1,0+0,5 мм, -0,5+0,315 мм, -0,315 +0,180 мм, -180+0,080 мм, -0,080+0,044 мм, -0,044+0 мм. Установлено, что в пробе исследуемой руды преобладает выход крупных классов: так, например, суммарный выход класса -3+0,5 мм достигает 69,1%, отмечен повышенный выход материала шламовой фракции в кр.- 0,044+0 мм – 7,3 %.

Определено, что содержание меди в исходной пробе составляет 0,43 %, при этом оно варьирует в пределах анализируемых классов от 0,34 до 0,76%, содержание меди увеличивается от крупных классов к более мелким. Среднее содержание молибдена в исходной пробе составляет 0,0063%, при этом его содержание также варьирует - от 0,0034% до 0,0081%. Установлено, что содержание золота составляет 0,41 г/т, вариации по

содержанию - от 0,32 до 0,74 г/т, при этом максимальное содержание отмечается в классе кр. -0,08+0,044 мм, следует отметить корреляцию наиболее высоких показателей по золоту и по меди в данном классе. Содержание серебра в исходной пробе достигает 1,12 г/т, при этом в зависимости от класса крупности оно варьирует от 0,74 до 1,8 г/т, максимум приходится на классы -0,18+0,08 мм и -0,044+0 мм.

Выявлено, что распределение меди пропорционально выходам классов крупности: наибольшая концентрация металла наблюдается в классах -3+2,5 мм (27,88%), -1,4+0,5 мм (27,4%), а также в классах -0,18+0,08 мм (10,45%) и -0,044+0 мм (10,24%). В распределении молибдена можно видеть несколько модальных пиков, свидетельствующих о повышенной концентрации его в следующих классах крупности: 13,0+2,5 мм (19,75%), -1,4+1 мм (17,31%), кл.-1+0,5 мм (20,15%), а также в шламовом классе -0,044+0 мм (9,27%).

Обнаружено, что распределение золота по классам крупности следующее: наибольшая концентрация благородного металла наблюдается в кл.-3,0+2,5 мм (23,11%), -1,4+0,5 мм (28,11%), а также в классе -0,044+0,0 мм (10,34%), что, по-видимому, говорит о наличии в пробе неравномерно распределенного металла. Распределение серебра имеет сходную тенденцию: в те же классы крупности распределяется 19,54%, 30,23% и 11,47% металла соответственно.

Химическим анализом установлено, что основным компонентом, слагающим руду, является кремнезем, содержание которого составляет 62,1%, присутствует значительное количество глинозема – до 14,94%, железа – до 5,5%, количество

щелочных и щелочноземельных металлов не превышает 10,72%, содержание серы достигает до 1,72% (при этом содержание сульфидной – 1,7%, что, вероятно, говорит о том, что почти вся сера сульфидная). Содержания в рудах ценных компонентов следующие: меди - 0,432%, молибдена – 0,0067%, золота – 0,42 г/т, серебра - 1,14 г/т.

Минеральным анализом определено, что основными нерудными породообразующими минералами являются (в порядке уменьшения), %: калиевые полевые шпаты и плагиоклазы – 40; кварц – 17; хлорит – 16; амфиболы – 10; минералы группы слюд (мусковит, серицит) – 7; гипс и ангидрит – 4; карбонаты (кальцит и доломит) – 2. Основными рудными минералами являются халькопирит и пирит - 0,8 и 0,7% соответственно, присутствуют окислы и гидроксиды железа – 16%, в руде отменено присутствие незначительного количества (единичные знаки) халькозина, ковеллина и борнита, молибденита, сфалерита, галенита и арсенопирита. Акцессорными минералами являются эпидот, ильменит, рутил, барит, апатит, циркон и другие (всего до 0,9 %).

Фазовый анализ руды на медь показал, что в подавляющем количестве вся медь в руде сульфидная (до 96,44%), имеется незначительное количество окисленных минералов меди (до 2,65%), вторичные сульфиды меди присутствуют в количестве до 0,81%, остальное приходится на долю связанных окисленных минералов.

Результаты рационального анализа на золото и серебро показали, что основная часть благородных металлов находится в самородном виде и в сростках с хлоридами, сульфатами и простыми

сульфидами серебра – 75,61% и 58,65% соответственно. Значительная часть золота и серебра является тонковкрапленной в сульфиды типа пирита и арсенопирита – 7,32 и 11,54 % соответственно, немалая доля связана с кварцем и алюмосиликатами – 14,63% и 7,69%. Для серебра также характерна, по сравнению с золотом, тесная связь с минералами и химическими соединениями сурьмы и мышьяка (до 21,15%). До 2,44% золота и до 0,96% серебра связаны с оксидами, гидрооксидами и карбонатами железа и марганца.

Перед проведением испытаний по флотации были выполнены исследования кинетики измельчения медно-молибденовых руд. Навески руды массой 1 кг измельчались в лабораторной мельнице марки 40МЛ в течение различного времени. Измельчение проводилось при постоянной шаровой загрузке при отношении Т:Ж:Ш=1:0,75:8. Измельченный продукт просеивался через сито с отверстиями 0,074 мм (200 меш). Определено, что для достижения тонины помола питания (перед коллективным циклом флотации), равной 80% класса-0,074 мм, навеску следует измельчать в заданных условиях 23 минуты.

Традиционный тест по флотации с кинетикой, а также тест по методике симуляции осуществлялись на механических флотомашинах ФЛ-240 (производства ООО «Гориндустрия», г. Киев) с объемом камеры 3 л, и 189 ФЛ с объемом 0,5 л. Масса исходной навески составляла 1 кг.

Продукты флотации направлялись на химический анализ (атомно-абсорбционный спектрометр Pin Aacle 900 F, PERKIN ELMER) с определением массовой доли меди, молибдена, железа, серы,

золота и серебра.

В данной работе освещены результаты выполнения тестов разбавления («dilution cleaning procedure») для одной из головных операций – I основной флотации. Эксперименты выполняли на исходной руде вместо обедненных по золоту и серебру хвостов гравитации, с целью получения достоверных данных в части содержания благородных металлов в продуктах обогащения в опытах традиционной флотации с кинетикой, а также в экспериментах по симуляции машин струйной флотации. Согласно нормативным документам, в I основной флотации (флотация «медной головки») рН=11 создается загрузкой извести при расходе 1450 г/т, далее подается веретенное масло при расходе 10 г/т. В качестве реагента-собирателя применяется реагент Aero MX5125 – 5 г/т, в качестве пенообразователя – Т-92 – 14 г/т.

Определено, что содержание меди в пенных продуктах фракционного съема при традиционной флотации не превышает 23,35%, при этом в опытах по симуляции машин струйной флотации качество достигает 26,67% (при содержании металла в пробах на уровне 0,42-0,43%), причем первые две фракции характеризуются наиболее высоким содержанием металла.

Установлено, что извлечение меди в суммарный концентрат (1-4 фракций) в опытах по симуляции выше на 8,08% по сравнению с традиционной флотацией (83,71% против 75,63% соответственно), при этом выход пенного продукта уменьшился с 4,54 до 1,52 %, что, вероятно, говорит о более селективном извлечении медных минералов в опытах по симуляции машин струйной флотации.

Определено также, что в опытах по

симуляции снижаются потери молибдена с хвостами: установлено, что извлечение в суммарный концентрат (1-4 фракции) выше на 10,02% (34,04% против 24,02% при обычной флотации с кинетикой).

Выявлено, что молибденит ведет себя схожим образом с сульфидами меди: пенные продукты симуляции имеют более высокую массовую долю молибдена 0,065-0,072% (против 0,013-0,024% при обычной флотации с кинетикой), извлечение молибдена в суммарный концентрат в этой операции составило 34,04 против 24,02% при традиционной флотации.

В тестах по симуляции отмечено также более высокое извлечение благородных металлов: по сравнению с тестом традиционной флотации, достигнуто более высокое извлечение золота 54,68% против 39,07% (т.е. более чем на 15,6%), а также серебра -25,52% против 15,51% (более, чем на 10%). Содержание золота и серебра в суммарном концентрате си-

муляции составляет 21,58 г/т и 26,83 г/т (против 4,19 г/т и 4,55 г/т) при содержании в исходной руде на уровне 0,5-0,6 г/т золота и 1,3-1,6 г/т. Следует отметить, что носителем благородных металлов является не только халькопирит, но и пирит, для выделения которого будет предусматриваться самостоятельный цикл флотации, поэтому потери благородных металлов в целом по схеме будут снижены.

Таким образом, результаты сравнительных испытаний по методике симуляции и традиционной флотации позволяют рекомендовать флотационные машины струйного типа для опытно-промышленных исследований. При положительном исходе испытаний, возможно замена парка используемого оборудования более современными, компактными и более эффективными единицами оборудования.

Список литературы

- 1 Вигдергауз В.Е. Перспективы снижения потерь молибденита при флотации / В.Е. Вигдергауз, Э.А. Шрадер, С.А. Сохоров // [Горный информационно-аналитический бюллетень](#). 2007. № 4. С. 390-395.
- 2 Адамов Э.В. Основы проектирования обогатительных фабрик: учеб. / Э.В. Адамов. - М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. - 647 с.
- 3 Bennett D/ Recent Process Developments at the Phu Kham Copper-Gold Concentrator, Laos /D D Bennett, I Crnkovic, P Walker // 11th MILL OPERATORS' CONFERENCE 2012/ HOBART, TAS, 29 - 31 OCTOBER 2012 [Электронный ресурс] Режим доступа: [file:///C:/Users/79509/Downloads/Recent-Process-Developments-at-the-Phu-Kham-Concentrator%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/79509/Downloads/Recent-Process-Developments-at-the-Phu-Kham-Concentrator%20(3).pdf)
- 4 Crnkovic I. Commissioning and optimisation of the Phu Kham Copper-Gold Concentrator / I. Crnkovic, T. Georgiev, G. Harbort, M. Phillips, Proceedings Tenth Mill Operators Conference, 2009 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne). pp 1-3.
- 5 Yuong M.F., Crnkovic I. Development of an Innovative Copper Flowsheet at Phu Kham. [Электронный ресурс] Режим доступа: <file:///C:/Users/79509/Downloads/Development%20of%20an%20Innovative%20Copper%20Flowsheet%20at%20Phu%20Kham.pdf>
- 6 Clayton R.The development and application of the Jameson Cell/ R.Clayton, G.J. Jameson, E.V. Manlapigi// Minerals Engineering, Vol. 4, Nos 7-11, pp. 925-933, 1991.

STUDY OF THE POSSIBILITY OF INSTALLING JET FLOTATION MACHINES FOR THE ENRICHMENT OF COPPER-MOLYBDENUM ORES

Vasyunina N.V.¹, Burdakova E.A.^{1,2}, Druzhinin K.E.³, Sisoeva Y.S.¹, Ivanova I.K.¹

¹Siberian Federal University,

²Institute of Chemistry and Chemical Technology (Siberian Branch of the Russian Academy of science);

³Indast-Pro

yanasisoeva2000@yandex.ru

keywords: copper, molybdenum, dilution test, extraction, jet flotation machines, collective flotation of sulfides

Jet flotation machines have proven themselves well in the enrichment of fine-grained pulps during the processing of non-ferrous metal ores. The main advantage of them is good work on the material of slurry size, due to which an increase in extraction is achieved. Due to the design features of the flotation machine, it is also possible to achieve high quality concentrates, which is achieved by irrigation of the foam layer at the stage of its removal and the loss of rock particles from the foam. Therefore, the study of the possibility of installing these flotation machines in the schemes of processing multicomponent ores is an urgent task.

The paper presents the results of laboratory studies carried out to assess the possibility of using jet flotation machines in the technological scheme of enrichment of copper-molybdenum ores containing gold and silver along the way. For ore processing, a collective-selective flotation scheme is used, according to which the collective cycle is realized with fine grinding – up to 80% of the cl.-0.074 mm. Taking into account the ability of copper sulfides and, especially, molybdenum to flake during grinding, in order to increase the completeness of the extraction of valuable components, jet flotation machines were tested. In these flotation machines, close contact between

bubbles and particles is ensured, and a small bubble size is created that is most suitable for flotation of fine particles.

The results of comparative tests in the operation «I collective flotation (copper head)» are presented, one of which is performed on a mechanical flotation machine with fractional removal of foam product, the other – on a mechanical machine, but according to the method of simulating the operation of jet flotation machines. The simulation is carried out by means of a test called «dilution cleaning procedure». Technological tests have established positive results in tests to simulate the operation of jet flotation: the extraction of copper, molybdenum, gold and silver is 83,72%, 34,04%, 54,68%, 25,52%, which is higher than the results achieved with conventional flotation with kinetics by 8.09%, 10.02%, 15.61% and 10.01%.

Thus, the results of comparative tests using the simulation method and traditional flotation allow us to recommend jet-type flotation machines for pilot research. With a positive outcome of the tests, it is possible to replace the fleet of used equipment with more modern, compact and more efficient units of equipment.