

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД

Давлатова Мафтуна Джуракуловна

Ташкентский государственный технический университет Алмалыкский филиал, горно-металлургический факультет, 2 курс, направление металлургия магистрант группы 1М-20мет

Холикулов Дониёр Бахтиярович

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент

ARTICLEINFO.

Ключевые слова:

Минераль, мед, некондиционных руд, горнодобывающих, отвал, выщелачивания, сульфид, отвал, рН, флотация, измельчения.

Аннотация

Проблема представляется актуальной не только с точки зрения расширения сырьевой базы металлургической и химической промышленности, увеличения добычи и выпуска металлов, но и с позиции ликвидации отвалов, высвобождения значительных площадей общественно полезных земель, охраны окружающей среды. Это обусловлено тем, что отвалы забалансовых и некондиционных руд, минерализованных горных пород, отработанные месторождения являются долговременным источником загрязнения окружающей среды за счет самопроизвольного выщелачивания из них меди, цинка, свинца, мышьяка и других металлов.

<http://www.gospodarkainnowacje.pl/>©2022LWAB.

Для медной отрасли Республики Узбекистан характерно истощение традиционной минерально-сырьевой базы цветных металлов, в том числе меди, сокращение балансовых запасов руд и накопление значительных запасов меди в техногенных минеральных образованиях горно-обогатительных и металлургических предприятий в виде отвалов бедных, некондиционных руд, вскрышных пород с рудной минерализацией, хвостов обогащения, отходов металлургического производства, оставление потерь в ранее разработанных участках недр как богатых, так и бедных окисленных и смешанных руд в целиках, локальных рудных телах, в зонах обрушения. Развитие рудной базы медной отрасли в современных условиях связывается не только с введением в эксплуатацию новых месторождений, но и с активным вовлечением в переработку низкосортного техногенного медьсодержащего сырья. Смешанные руды, за складированные в отвалах на большинстве медных месторождений, являются наиболее сложными для переработки и характеризуются низким уровнем извлечения меди.

Существенное истощение минерально-сырьевой базы, сокращение балансовых запасов руд и одновременно нахождение значительных запасов металлов в техногенных минеральных образованиях являются характерными тенденциями для многих горнодобывающих предприятий

страны. При этом практически на всех меднорудных предприятиях имеется в значительных объемах 15 нетрадиционное минеральное сырье в виде отвалов бедных и забалансовых руд с низким содержанием металлов, в качестве потерь в недрах месторождений оставлены как богатые, так и бедные руды в виде целиков, отдельных локальных рудных тел, в закладочном массиве, в зонах обрушения, в неразработанных минерализованных зонах ранее некондиционных руд, которые в соответствии с горнотехническими условиями эксплуатации месторождений или из-за низких содержаний полезных компонентов не обрабатывались. Кроме того, накоплены огромные количества отходов горно-обогажительного и металлургического производств. Запасы ценных компонентов в таких техногенно-минеральных образованиях исчисляется десятками тысяч тонн цветных, редких и благородных металлов и в настоящее время практически не используются. Объемы забалансовых руд в отвалах, в виде окисленных и смешанных руд в зонах окисления, в недрах и накопленных на поверхности техногенных образованиях на крупных месторождениях меди в Узбекистане, являются значимыми потенциальными ресурсами для восполнения минерально-сырьевой базы меднорудной отрасли при переработке их комплексными технологиями обогащения и выщелачивания.

Разработаны гидрометаллургические технологии извлечения меди из забалансовых, окисленных медных руд с применением методов выщелачивания, экстракции – электролиза, обеспечивающих высокое извлечение меди в высокосортную товарную продукцию – катодную медь высокой чистоты с содержанием меди 99,99%.

Низкое извлечение меди при обогащении окисленной руды определило условное отнесение ее к забалансовой, несмотря на наличие в руде содержания меди, соответствующего принятым кондициям. Минералогическими исследованиями было установлено, что в окисленных рудах, содержащих 88,42 % окисленных форм меди, преобладает малахит. Малахит представлен метаколлоидными радиально-лучистыми выделениями, локализованными в зерновом пространстве, порах и микротрещинах. Характерной особенностью руд является повышенное содержание в них гипса, карбонатов и глинисто-слюдистых веществ, отрицательно влияющих на извлечение меди в концентрат. Вмещающие породы – загипсованные серые мергели, известняки и алевролиты.

Однако, при флотационной переработке отвала можно заведомо прогнозировать низкие показатели извлечения меди, что обусловлено сложным вещественным составом заскладированного в отвале материала, который по сути является смешанной медной рудой. Известно, что окисленные и смешанные медные руды, находящиеся в верхних горизонтах на всех медных месторождениях, являются вторичными медными образованиями в результате окисления сульфидов меди по схеме: первичные сульфиды (халькопирит CuFeS_2 , борнит Cu_5FeS_4) → вторичные сульфиды (халькозин Cu_2S , ковеллин CuS) → лимонит в смеси с самородной медью Cu , купритом Cu_2O , теноритом CuO , малахитом $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$, азуритом $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$, силикатами и другими минералами меди. Считается, что образование вторичных сульфидов меди происходит в основном в зоне вторичного сульфидного обогащения, где свободный кислород практически отсутствует и среда характеризуется достаточно высокими восстановительными свойствами. В менее восстановительной среде вторичные сульфиды меди окисляются, например, халькозин окисляется с образованием самородной меди и куприта. Для самородной меди характерно развитие ее в виде мелких зерен, рассеянных в куприте, или в виде скоплений в пустотах лимонита. В присутствии $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ халькозин замещается тонкой пленкой лимонита и куприта, образуя так называемые кирпичные руды. Основные карбонаты меди – малахит и азурит образуются в результате взаимодействия CuSO_4 с кальцитом и доломитом. Они развиваются в результате как замещения карбонатов, присутствующих во вмещающих породах, так и заполнения полостей. В этом случае возникают специфические для малахита агрегаты колломорфной текстуры, состоящие из чередующихся тонких слоев малахита и фосфатов, хризоколлы, кварца. Силикаты группы хризоколлы образуются в результате фиксации меди при

взаимодействии с кремнекислыми соединениями. К хризоколлам относят разнообразные минералы от опалов и каолинов с небольшим содержанием адсорбированной меди до водных силикатов меди – хризоколлы $\text{CuSiO}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CuSiO}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ диоптаза. Обычно они аморфны или крипстокристалличны и обладают типичными колломорфными текстурами. Редко можно встретить зону окисления, в которой в том или ином (иногда значительном) количестве не присутствовали бы силикаты группы хризоколлы. Галоидные соединения меди относятся к редким минералам окисленных руд, за исключением атакамита $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$. Фосфаты меди – бирюза $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \times 5\text{H}_2\text{O}$ и элит $\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4 \times \text{H}_2\text{O}$ в заметных количествах образуются лишь при достаточном содержании апатита или других фосфатов в боковых породах и жильной массе, тогда как арсениты и арсенаты меди характерны только для зон окисления энаргитовых месторождений со значительным содержанием мышьяка в рудах. В условиях крайне сухого климата могут образовываться большие скопления сульфатов меди – халькантита $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$, брошантита $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$. Кроме меди, иногда золота и серебра, других ценных компонентов в окисленных рудах, как правило, не содержится.

По степени окисления руды медных месторождений подразделяются на сульфидные, смешанные и окисленные. Критерием для отнесения руд к тому или иному типу служит содержание меди в оксидной форме: для сульфидных руд – до 10 %; смешанных – 11–50 %; окисленных – более 50 %; но для каждого месторождения эта цифра уточняется в процессе технологических исследований. Окисленные и смешанные медные руды являются весьма труднообогатимыми, что обусловлено: 25 – сложным, многообразным и крайне непостоянным минеральным составом; – тонкой структурой; – значительной каолинизацией и серитизацией вмещающих пород; – большим содержанием охристо-глинистых шламов и растворимых солей; – отличающимися флотационными свойствами различных минералов меди. Вторичные сульфиды меди (халькозин, ковеллин) обычно флотируются лучше первичных халькопирита и борнита. К сравнительно легкофлотируемым относятся минералы так называемой свободной меди: малахит, азурит, куприт, тенорит; к труднофлотируемым – минералы связанной меди: хризоколла, диоптаз, практически неизвлекаемые – алюмосиликаты и фосфаты меди, а также медь, тесно связанная с гидроксидами железа и марганца. Минералы водорастворимой меди (халькантит, бутит) требуют для своего извлечения из раствора применения специальной физико-химической технологии. Таким образом, характерной особенностью окисленных и смешанных руд медных природных и техногенных месторождений является большое разнообразие минерального состава и парагенетических соотношений.

Окисленные и смешанные руды обогащаются значительно хуже, чем сульфидные, особенно содержащие медь в силикатной форме, и могут перерабатываться флотацией, выщелачиванием, по комбинированным схемам, сочетающим методы обогащения, выщелачивания, пиро и гидрометаллургии. Определяющим признаком флотируемости руд считается степень их окисления, по мере увеличения которой возрастает содержание труднофлотируемых минералов меди: сульфатов (брошантит, антлерит, халькантит), силикатов (хризоколла) и фосфатов (бирюза), а также возрастает склонность руд к ошламованию. Флотация применяется для неупорных окисленных и смешанных медных руд для эффективного отделения сульфидных и окисленных минералов от породы, разделения сульфидов меди и железа, доизвлечения благородных металлов и других ценных компонентов в отдельные продукты или концентраты. Различие флотационных свойств сульфидов и оксидов меди и различный характер их сростков и вкрапленности, склонность окисленных медных минералов к переизмельчению привели к использованию на обогатительных фабриках раздельной флотации сульфидных и окисленных минералов меди. Коллективную флотацию сульфидов меди и железа проводят с применением этилового («Нчанга»), изопропилового (месторождения «Банкрофт», «Нчанга»), бутилового (месторождение «Камото») или амилового (месторождения «Сакатон», «Кристанс») ксантогенатов. Причем, чем больше степень окисления поверхности сульфидов и хуже их

флотуемость, тем длиннее аполлярная цепь применяемого собирателя. Иногда ксантогенаты применяются в сочетании с дитиофосфатом (месторождения «Сакатон», «Нчанга») или с производными меркаптобензотиазола (месторождение «Кристалмас»). Значение рН при коллективной флотации не должно превышать 8,5, чтобы обеспечить при небольших расходах собирателя эффективную флотацию сульфидов меди и 27 железа в концентрат. Последующее разделение ценных компонентов из полученных коллективных медно-пиритных концентратов осуществляется в известковой среде при рН больше 10 для депрессии сульфидов железа при наибольшей селективности флотационного процесса. Главные промышленные сульфидные минералы меди – халькопирит, борнит и халькозин – имеют хорошие флотационные свойства, а для усиления флотуемости окисленных минералов меди используют предварительную сульфидизацию. Совместная флотация сульфидных и окисленных минералов меди в присутствии сульфидизатора при депрессии сульфидов железа известью проводится только при низкой степени окисления и переменном содержании окисленной меди в руде, как, например, на Алмалыкской, Балхашской обогатительных фабриках и на фабрике «Маркоппер». Вследствие неоднородности вещественного состава перерабатываемых руд необходима оптимизация расходов известки в пределах 500-1500 г/т, подаваемой в измельчение, и сернистого натрия в интервале 300-1000 г/т, подаваемого в цикл измельчения или основную флотацию. Существуют различные режимы флотации окисленных минералов меди из окисленных руд или из хвостов сульфидной флотации в зависимости от степени окисленности медных минералов, состава вмещающих пород и других факторов. Флотация окисленных минералов меди с оксигидрильными собирателями применяется при переработке руд с силикатной или глинистой породной составляющей с незначительным содержанием карбонатов и гидроксидов железа. В качестве оксигидрильных собирателей применяют жирные кислоты, их мыла, смеси твердых и жидких жирных кислот. Флотация с применением карбоновых кислот и других оксигидрильных собирателей в целом недорогой процесс, но не обеспечивает селективность извлечения компонентов: медные концентраты часто содержат более 50% породы. Кроме того, при использовании режимов с оксигидрильными собирателями хорошо извлекается только малахит, хуже куприт и совсем плохо хризоколла и другие силикаты меди.

Наиболее распространенным методом обогащения руд с карбонатной или весьма ожелезненной породой является флотация окисленных минералов меди сульфгидрильными собирателями после сульфидизации. Наиболее распространенными сульфидизаторами являются сернистый натрий, гидросульфид натрия или его смесь с сернистым натрием [1]. Расход сульфидизатора возрастает с увеличением содержания в руде меди, шламов, растворимых солей и составляет на разных фабриках от 0,2 до 2 кг/т [3]. Собирателем чаще всего служит бутиловый или амиловый ксантогенат, который подают во флотацию после каждой загрузки сульфидизатора. Расход собирателя составляет 0,1-0,2 кг/т и возрастает при переработке богатых и сильно шламистых руд. Регулирование процесса сульфидизации может быть осуществлено по величине электрохимических потенциалов ионоселективных и сульфидсеребряных электродов. Оптимальное значение потенциала сульфидного электрода при сульфидизации и флотации окисленных минералов меди находится в пределах 400-600 мВ при рН 9-10. Основные потери окисленной свободной меди наблюдаются в тонких классах, чаще при переработке сильношламуемых руд [1], поэтому на ряде фабрик («Кристалмас», «МаунтИза») используется схема с отдельной флотацией песков и шламов. Флотация окисленных минералов меди смесью сульфгидрильных и оксигидрильных собирателей после предварительной сульфидизации также применяется на ряде зарубежных фабрик, таких как «Банкрофт», «Нчанга» и др. К примеру, на фабрике «Банкрофт» в качестве собирателей используют амиловый ксантогенат и хлопковое масло, которое одновременно является пенообразователем. Сульфидизация хвостов сульфидной флотации осуществляется гидросульфидом натрия при расходе 0,68-0,9 кг/т. Получаемый окисленный концентрат содержит 16,5% меди при извлечении ее 33%. Общее извлечение меди в сульфидный с содержанием меди до 60% и окисленный концентраты составляет 83%. На

фабрике «Нчанга» в качестве собирателя 29 используется сочетание амилового ксантогената (35 г/т) и пальмового масла (40- 75 г/т), добавка нефти понижает вязкость пальмового масла и, действуя как модификатор пены, повышает эффективность его действия. Сульфидизатор – гидросульфид натрия (1,1-1,3 кг/т) подается в начало цикла основной флотации. Анализ рассмотренных способов флотационного обогащения окисленных и смешанных медных руд свидетельствует, что они не обеспечивают высокое извлечение меди из хризоколлы и других силикатов. При обогащении руд, в которых минералы меди представлены в значительной мере связанной медью, перспективна флотация сульфгидрильными собирателями после восстановления поверхности окисленных минералов до металлической меди (формальдегидом). В целом, схемы и режимы флотационного обогащения окисленных и смешанных медных руд могут быть оправданы и применяются для достаточно богатых руд, содержащих 4-5% меди [3]. В настоящее время в перспективных месторождениях таких руд практически нет, либо очень мало. Для переработки труднообогатимых окисленных и смешанных руд, при нахождении меди в виде силикатов, алюмосиликатов, фосфатов, в водорастворимых формах, а также сорбционно связанной с гидроксидами железа и марганца, при невозможности селективного отделения минералов породы от медных минералов флотацией, применяются комбинированные схемы с предварительным кислотным выщелачиванием. Разработано большое количество вариантов комбинированных схем, когда выщелачиванию подвергается вся руда или только наиболее труднообогатимая часть – промпродукты, хвосты или шламы. Для извлечения меди из раствора выщелачивания применяются цементация, экстракция, сорбция, электролиз. Из комбинированных методов переработки сульфидно-окисленных медных руд наибольшее распространение получил процесс, разработанный в В. Я. Мостовичем и В. А. Ванюковым (метод Мостовича), который включает выщелачивание окисленной меди серной кислотой, осаждение (цементацию) меди, перешедшей в раствор, металлическим железом и флотацию цементной меди. По комбинированной схеме «выщелачивание – цементация – 30 флотация» измельченная руда или продукты обогащения подвергается выщелачиванию слабыми растворами серной кислоты в чанах с мешалками. Пульпа с растворенной медью сначала поступает в чаны-цементаторы, куда добавляют губчатое железо или измельченную чугунную стружку, а затем – во флотационные машины. Цементная медь в виде тонких частичек флотируется в слабокислой среде с получением богатого концентрата и отвальных хвостов. Процесс характеризуется высокой скоростью выщелачивания, отсутствием необходимости отделения раствора от твердых частиц и его очистки перед цементацией, возможностью наиболее полного извлечения во флотационный концентрат вместе с цементной медью и сульфидов меди, возможностью извлечения в медный концентрат благородных и некоторых иных металлов (на 60-70%), которые при выщелачивании серной кислотой практически не растворяются и остаются в отвальном продукте. Расход кислоты в среднем составляет 3-5 кг/кг выщелачиваемой меди, что 2-3,5 раза больше теоретически необходимого. При этом 35-40% кислоты расходуется на растворение медных минералов, 55-40% – на растворение минералов породы, 15-20% находится в пульпе в виде свободной кислоты. Расход серной кислоты может увеличиваться до 7,5-10 кг/кг меди при переработке «упорных» руд, где медь сорбционно связана с гидроксидами железа и марганца, алюмосиликатами, гидрослюдами. Расход железа на цементацию также колеблется в широких пределах – от нескольких до 30 кг/т при содержании меди в растворе после цементации 0,01-0,02 г/л. Эффективными собирателями цементной меди и сульфидных минералов в кислой среде являются гидролизованные дитиофосфаты, диксантогениды, тиоангидридыксантогеновых и диалкилдитиофосфорных кислот, смешанные ангидриды и эфиры этих кислот, реагент СЦМ-2, дополнительными собирателями – углеводородные масла и карбоновые кислоты. Расход собирателей – 50-150 г/т. Конечные результаты комбинированного процесса зависят от полноты цементации и pH среды в основной флотации (оптимальное значение 4,5-4,9). 31 Полностью по схеме комбинированного процесса «выщелачиваниецементация-флотация» перерабатывают окисленные и смешанные руды,

непосредственная флотация которых не обеспечивает удовлетворительного извлечения меди. Также комбинированную схему можно применять для переработки только шламовой части руды, хвостов или промпродуктов флотации, если в них концентрируется основная масса трудноизвлекаемых минеральных форм меди, что обеспечивает сокращение расхода кислоты на выщелачивание и железа на цементацию. Несмотря на отмеченные выше преимущества комбинированного процесса, он не получил широкого промышленного распространения из-за высоких расходов кислоты при выщелачивании меди и железа при ее цементации, необходимости специальной операции выщелачивания перед обогащением, необходимости применения во всех циклах и операциях кислотостойкого оборудования, невозможности использования для переработки карбонатных руд [1]. Его применение наиболее эффективно при переработке труднообогатимых окисленных и смешанных руд, извлечение меди из которых флотацией не превышает 50-70% при содержании меди в исходной руде 0,7-1%. При использовании комбинированного процесса извлечение меди увеличивается до 80-90%. Разновидностями комбинированного процесса являются схемы: выщелачивание – осаждение – флотация; флотация – выщелачивание – сорбция – электролиз; флотация – выщелачивание – экстракция – электролиз. Разработан комбинированный гидрометаллургическо-флотационный способ переработки смешанных медных руд, включающий дробление и измельчение руды, выщелачивание измельченной руды раствором серной кислоты с концентрацией 10-40 г/дм³ при перемешивании, при содержании твердой фазы 10-70%, продолжительности процесса 10-60 мин, обезвоживание и промывку кека выщелачивания, объединение жидкой фазы выщелачивания руды с промывными водами кека выщелачивания, освобождение объединенного медьсодержащего раствора от твердых взвесей, извлечение меди из медьсодержащего раствора с 32 получением катодной меди и флотацию медных минералов из кека выщелачивания при значении рН 2,0-6,0 с получением флотационного концентрата. Извлечение меди из медьсодержащего раствора проводят методом жидкостной экстракции и электролизом. Суть данного способа переработки сульфидно-окисленных медных руд состоит в том, что в растворах серной кислоты с концентрацией 10-40 г/дм³ полностью растворяются труднофлотируемые окисленные минералы меди и до 60% вторичных сульфидов меди, а последующее извлечение минералов меди, оставшихся в кеке выщелачивания, можно производить в режиме флотации сульфидных минералов со значительным снижением нагрузки на флотационное обогащение и расхода собирателей.

При применении описанного способа к смешанной медной руде Удоканского месторождения с содержанием меди 2,1%, из которых 46,2% находятся в окисленных минералах, было получено сквозное извлечение меди из руды 91,4%. При этом руда, измельченная до крупности 90% класса минус 0,1 мм, выщелачивалась в течение 30 минут в чане с перемешиванием при поддержании концентрации серной кислоты на уровне 10 г/дм³. Флотационное обогащение кека сернокислотного выщелачивания проводилось при рН 5,0 с использованием в качестве собирателей бутилового ксантогената калия и диэтилдитиокарбамата натрия (ДЭДТК). Переработка медьсодержащих растворов включала экстракцию меди раствором органического экстрагента LIX 984N, реэкстракцию и электролиз с получением катодной меди. Комбинированные схемы с сернокислотным выщелачиванием обеспечивают вполне удовлетворительное извлечение окисленных и сульфидных минералов меди, а также извлечение в медный концентрат дополнительно и благородных металлов, поэтому эффективны при переработке сульфидноокисленных медных руд. Но поскольку капитальные затраты и эксплуатационные расходы на процесс весьма высоки, рентабельность переработки будет всегда определяющим фактором. Кроме того, такие схемы не применимы, если руда 33 содержит значительное количество карбонатных и других кислоторастворимых породных минералов. Вовлечение в эксплуатацию бедных, забалансовых руд, металлсодержащих вскрышных пород, хвостовых отвалов, ввиду сложного вещественного состава сырья и низкого содержания меди, делают практически невозможным и нецелесообразным применение для их переработки

традиционных схем и режимов флотационного обогащения и комбинированных процессов. Это предопределило широкое развитие в качестве самостоятельного направления геотехнологического способа переработки таких объектов с кислотным выщелачиванием меди. Чаще всего кучному выщелачиванию водными растворами серной кислоты подвергают бедные по содержанию меди (1-2%) окисленные руды из верхней зоны месторождений с нерентабельным для извлечения содержанием благородных металлов. Основным растворителем при выщелачивании окисленных медных минералов является серная кислота, в которой хорошо растворяются тенорит CuO , брошантит $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$, малахит $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$, азурит $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$, атакамит $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ и в присутствии кислорода куприт – Cu_2O . Значительно труднее выщелачивается медь, связанная с силикатами, алюмосиликатами, алюмофосфатами, гидроксидами железа, а также медь, представленная бирюзой, медистым галлуазитом. Добавки фторидов (NH_4HF , NaF , NH_4F) к раствору серной кислоты в таких случаях позволяют значительно увеличить извлечение меди в раствор [1]. Основным окислителем и растворителем сульфидов и металлической меди является сернокислый раствор сульфата оксида железа (III), который образуется при окислении пирита и халькопирита. В порядке убывания скорости выщелачивания наиболее распространенные сульфиды меди располагаются в ряд: халькозин > борнит > ковеллин > халькопирит. Контролирующей стадией при выщелачивании сульфидов является стадия их окисления. Присутствие микроорганизмов, таких, как например, тиобацилусферрооксиданс, приводят к резкому увеличению скорости окисления и растворения сульфидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, А. А. Технология обогащения окисленных и смешанных руд цветных металлов / А. А. Абрамов. – М. Недра, 1986. – 302 с.
2. Абрамов, А. А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: учебник для вузов. В 3 т. / А. А. Абрамов. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. – Т. II. Технология обогащения полезных ископаемых. – 510 с.
3. Абрамов, А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов: учебное пособие для вузов. В 2 кн. / А. А. Абрамов. – М. Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. – Кн. 1. Том III. Рудоподготовка и Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn руды. – 575 с.
4. Абрамов, А. А. О роли сульфидизатора при флотации окисленных минералов цветных металлов / А. А. Абрамов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1969. – №5. – С. 7-13.