

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ»

11-12 апреля 2016 года

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 536.212

ИЗУЧЕНИЕ НАГРЕВА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ЗОЛОТА В ГОРНЫХ  
ПОРОДАХ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Федоров С.А., Амдур А.М., Янчурина М.М.  
Уральский государственный горный университет

Чтобы извлечь микроскопическое золото известными способами обогащения, его частицы необходимо укрупнить. Для этого золото должно находиться в жидком состоянии. В этом случае капли могут двигаться под действием термокапиллярного эффекта, если существует перепад температур по сечению капель (градиент температуры). Величина этого перепада непостоянна и зависит от многих факторов в процессе нагрева

Цель данного исследования: установить зависимости изменения градиента температуры по сечению частиц золота микроскопического размера при нагреве в различных средах.

Расчет градиента температур производился с помощью пакета Matlab. Необходимые свойства золота и горных пород взяты из источников [1-2]. Температура на границах системы составляла 1000°C, радиус частицы золота - 60 мкм, размер каждой среды - 0,96·0,96 мм.

Фиксировались значения градиента температуры примерно через одинаковые промежутки времени, но эти промежутки уменьшались там, где происходят резкие изменения градиента температуры. По полученным данным измерений и расчетов построены графики зависимости изменения градиента температуры с течением времени нагрева (рисунок 1).

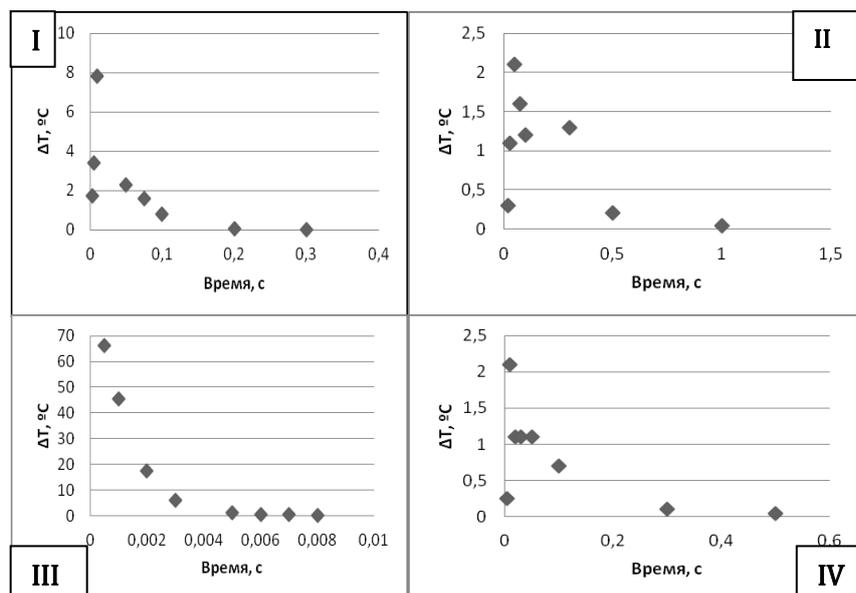


Рисунок 1 –  
Зависимость перепада температур на противоположных торцах частицы золота при нагреве в различных средах от времени. Температура среды 1000° С: I – монолитный кальцит, II – пористый кальцит, III – кварц, IV – силикатное стекло

Установлено, что самые крупные значения градиента температуры ( $\Delta T$ ) лежат в первых 12-15% полного времени прогрева. После прохождения этого порога,  $\Delta T$  резко падает до очень низких значений (десятые и сотые доли градуса) и постепенно снижается до нуля. Среди четырех сред выделяется только одна – кварц: там доля временного интервала с крупными значениями  $\Delta T$  повышается до 30%. Это объясняется более близкими теплофизическими значениями среды к золоту. В целом наблюдается зависимость данного предел времени нагрева, содержащих крупные значения  $\Delta T$ , от разницы теплофизических характеристик среды и золота: чем ближе теплофизические характеристики среды к золоту, тем наибольшую часть от времени полного прогрева занимает диапазон высоких значений  $\Delta T$ .

Для двух частиц золота было проанализировано: как сильно изменяется градиент температуры, когда одна частица золота экранирует другую. Все данные для расчетов аналогичны вышеупомянутым данным для одной частицы. Радиус экранирующей частицы 60 мкм, экранируемой – 57 мкм, расстояние между частицами 8,6 мкм. Анализировались только две среды: пористый кальцит и кварц. Данные расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Изменение  $\Delta T$  с течением времени (до полного прогрева) при экранировании одной частицей золота другой.

Пористый кальцит			Кварц		
Время, с	$\Delta T$ капли 1, °C	$\Delta T$ капли 2, °C	Время, с	$\Delta T$ капли 1, °C	$\Delta T$ капли 2, °C
0,05	14,7	3,0	0.0005	118,3	68,3
0,07	10,9	3,4	0.001	62,8	48,9
0,1	6,2	2,1	0.0015	46,9	30,5
0,2	3,9	2,1	0.002	29,1	19,9
0,5	0,5	0,8	0.003	10,9	8,8
1	0,88	0,36	0.005	1,7	1,2
1,5	0,02	0,005	0.007	0,31	0,21

При экранировании  $\Delta T$  экранирующей частицы золота превышает  $\Delta T$  экранируемой частицы в течении всего времени нагрева системы: в пористом кальците разница в 3-4 раза, в кварце - в 1,5 раза. У экранирующей частицы  $\Delta T$  по отношению к частице, которая находится одна в системе, повышается в несколько раз (почти на порядок в пористом кальците). У кварца, в отличии от пористого кальцита, отношение  $\Delta T$  экранируемой частицы к экранирующей стабильно на всем промежутке времени.

В итоге можно сделать следующие выводы:

1. Градиент температур на торцах частиц золота будет относительно большим при нагреве в средах, у которых теплоемкость и теплопроводность близки к значениям, характерным для золота.

2. Самые крупные значения  $\Delta T$  лежат в пределах первых 12-30% от полного времени прогрева. В этом же диапазоне скорость частиц будет иметь максимальные значения.

4. Установлено: чем ближе теплофизические характеристики среды к золоту, тем наибольшую часть от времени полного прогрева занимает диапазон высоких значений  $\Delta T$ .

5. При экранировании,  $\Delta T$  той частицы, которая экранируется, снижается в 1,5-4 раза по отношению к экранирующей частице. У последней  $\Delta T$  повышается в несколько раз по отношению к  $\Delta T$  одиночной частицы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства элементов. Киев: Наукова думка, 1965.
2. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., 1991.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА ПОРОШКА КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ИЗ ПАРАВОЛЬФРАМАТА АММОНИЯ

Апакашев Р.А., Лазарева Т.Ю., Усманова В. А.  
Уральский государственный горный университет

Карбид вольфрама WC - один из основных компонентов специальной керамики, характеризующейся длительной высокотемпературной стойкостью [1,2]. Распространенный способ получения подобной керамики - спекание порошков. При этом имеет значение дисперсность исходного порошка огнеупорного материала. Малый размер частиц спекаемого порошка способен существенно повысить эксплуатационные параметры керамических изделий. Однако получение нано- и микродисперсных порошков различных материалов является энергозатратным процессом, что формирует их высокую стоимость.

Поэтому является актуальным повышение эффективности синтеза карбида вольфрама для обеспечения максимального выхода продукта. Одно из возможных действий в этом направлении - оптимизация технологических параметров процесса получения высокодисперсного порошка карбида вольфрама.

В настоящей работе в качестве объекта исследования изучали технологический метод получения высокодисперсного порошка карбида вольфрама из порошка паравольфрамата аммония и углеродосодержащего материала. Данный метод обеспечивает существенное энергосбережение за счет уменьшения температуры и длительности синтеза, а также дополнительно позволяет снизить материальные затраты на получение карбида за счет использования доступного вольфрамсодержащего сырья.

Синтез высокодисперсного порошка карбида вольфрама осуществляли в лабораторных условиях по методике, предложенной в работе [1]. Для синтеза использовали паравольфрамат аммония производства ОАО «Кировградский завод твердых сплавов».

Шихту из паравольфрамата аммония и углеродосодержащего материала готовили тщательным перемешиванием в агатовой ступке предварительно взятых навесок паравольфрамата аммония и активированного угля. Активированный уголь брали в определенном избытке, превышая стехиометрическое количество углерода, необходимое для образования карбида вольфрама WC. После перемешивания компонентов 40,00 г шихты помещали в стальную пресс-форму, обеспечивающую получение брикетов цилиндрической формы диаметром 25,0 мм. Для прессования образцов применяли машину сжатия (пресс) МС-1000.

Прессованные заготовки в форме брикетов помещали в реактор цилиндрической формы из плавного кварца. Реактор имел следующие размеры: диаметр 60 мм, длина (высота) 203 мм. Соотношение суммарного объема прессованных заготовок и внутреннего пространства реактора варьировали, помещая в реактор блоки шамотного огнеупора. При этом каждый раз в реактор загружали по три образца прессованной шихты. Внутреннее пространство реактора герметизировали с помощью огнеупорной замазки и соединяли с атмосферой через гидрозатвор.

Реактор устанавливали в высокотемпературную камерную печь, оборудованную термоконтроллером для электронного управления нагревом. Затем печь нагревали и выдерживали заданное время при фиксированной температуре.

После высокотемпературной выдержки реактор с внутренним содержимым охлаждали до комнатной температуры. Брикет вытаскивали из реактора и подвергали механическому разрушению, раздавливая в агатовой ступке. Из-за высокой пористости и отсутствия агломерации частиц брикет легко рассыпался. Продукт синтеза - карбид вольфрама отмывали от свободного углеродосодержащего материала сначала водой, а затем этиловым спиртом.

Применение паравольфрамата аммония для получения карбида вольфрама обеспечивает повышенное давление восстановительной атмосферы водорода в изолированном объеме

реактора. Газообразный водород образуется при термическом разложении аммиака, выделяющегося при нагревании паравольфрамата аммония.

Водородосодержащая восстановительная атмосфера способствует полному восстановлению металлического вольфрама и его последующей карбидизации. Относительная невысокая температура в реакторе и контролируемая продолжительность процесса синтеза минимизируют спекание и рост зерна, возможные за счет собирательной рекристаллизации получаемого карбида. Это обеспечивает получение высокодисперсного продукта. Важно, что разложение паравольфрамата аммония происходит с выделением газообразных продуктов, не загрязняющих синтезируемый карбид, что подтверждается результатами аттестации образцов синтезированного карбида вольфрама.

Всего в настоящей работе было проведено 9 синтезов при различных технологических параметрах процесса. Исследовали влияние на выход карбида вольфрама таких технологических параметров, как давление прессования исходной шихты, количество углеродного материала в шихте, соотношение объемов прессованных заготовок и внутреннего пространства реакционного контейнера, а также температура и продолжительность синтеза.

Практический выход карбида вольфрама рассчитывали в процентах от максимально возможного теоретического выхода. Для определения теоретического выхода карбида вольфрама WC учитывали стехиометрическое количество вольфрама, содержащегося в исходной навеске паравольфрамата аммония. Выход карбида вольфрама в каждом синтезе рассчитывали как среднюю величину из трех значений (по трем образцам в каждой серии).

Аттестацию образцов полученного карбида вольфрама проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 40, оборудованного приставкой для химического микроанализа.

По данным химического анализа синтезированный карбид вольфрама по содержанию углерода близок к стехиометрической формуле WC. Массовая доля углерода в частицах порошка карбида не выходит за пределы интервала 5,8 - 6,2 %. Кроме вольфрама и углерода в карбиде установлено наличие кислорода, массовая доля которого в отдельных частицах достигает 2,1 %.

При этом в синтезированном материале отмечается количественное преобладание частиц карбида вольфрама, соответствующих двум размерным диапазонам: 100 - 200 нм и 2,0 - 8,0 мкм. Морфология полученного порошка WC представлена относительно крупными частицами карбида вольфрама, окруженными более мелкими частицами. При этом для частиц микронного диапазона характерно наличие четкой огранки, отсутствующей у наноразмерных частиц.

На основании результатов проведенных экспериментов установлены оптимальные технологические параметры процесса синтеза высокодисперсного порошка карбида вольфрама, обеспечивающие высокий практический выход продукта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Р. А. Апакашев, С. Я. Давыдов. Способ синтеза высокодисперсного порошка карбида вольфрама // Новые огнеупоры. - 2015. № 3. - С. 19-20.
2. Rempel A.A., Belova N. S., Kurlov A. S., Valeeva A. A. Synthesis, structure and properties of advanced nanocrystalline ceramics: carbides, oxides and sulfides. In: 7th Intern. Conf. On Nanostructured Materials NANO 2004 (June 20-24, 2004, Wiesbaden, Germany). Wiesbaden. 2004. P.307

## ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ТЕКУЩИХ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ КОЛЧЕДАНЫХ РУД\*

Волкова И.А., Гайсина Л.И.

Научные руководители: Орехова Н.Н., д-р техн. наук, профессор; Горлова О.Е., канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Природные ресурсы Урала отличаются большим разнообразием и оказывают огромное влияние на его специализацию и уровень развития.

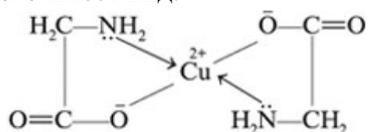
На современном этапе развития экономики происходит масштабное снижение сырьевого потенциала горно-обогатительных и металлургических предприятий Южного Урала. В связи с ростом потребления цветных металлов возникает необходимость в переработке отходов горно-обогатительного комплекса, характеризующихся повышенным содержанием полезных компонентов и доступностью. В качестве таких отходов обычно рассматривают шлаки, шламы металлургического производства и хвосты обогащения [1].

В уральском регионе уже накоплено порядка 1,7 млрд. т отходов обогатительного передела колчеданных руд, заскладированных в хвостохранилищах [2], которые ежедневно пополняются в среднем на 50 тыс. т. Несмотря на постоянное совершенствование технологий флотационного обогащения колчеданных медно-цинковых руд, ввиду их вещественного состава и текстурно-структурных особенностей полного извлечения ценных компонентов этим методом не достигается.

В настоящий момент среднее содержание меди в текущих хвостах обогащения оценивается на уровне 0,2 %. Для извлечения меди из хвостов наиболее целесообразным и рентабельным считается кислотное выщелачивание. Серная кислота легко переводит в раствор окисленные минералы меди. Сульфидные минералы не реагируют с серной кислотой и только ковеллин и халькозин медленно реагируют с ней и частично переходят в раствор. Интерес представляет поиск методов, позволяющих проводить выщелачивание как раз из хвостов, в которых основная форма присутствия меди – сульфидные минералы.

В качестве объектов исследования взяты хвосты текущей переработки Сибайской и Хайбуллинской обогатительных фабрик (ОФ), среднее содержание меди в которых 0,2% и 0,19% соответственно. Медь в хвостах представлена халькопиритом, который преимущественно находится в сростках с пиритом. На тонкие классы  $-0,44+0$  мм приходится более 90% меди [3]. Хвосты, в которых медь представлена халькопиритом, является трудно выщелачиваемыми.

Задача исследования заключалась в изучении возможности интенсификации выщелачивания меди из хвостов с применением реагента-комплексобразователя и изменением водно-воздушного режима выщелачивания. В качестве реагента-комплексобразователя по результатам литературного и патентного обзоров выбрана аминоктановая кислота. Данный реагент способен образовывать с ионами меди комплексное соединение, структурная формула которого имеет вид:



Выщелачивание проводилось по методике «бутылочного теста» в режиме встряхивания с соотношением Ж:Т=4:1, при постоянной амплитуде и частоте колебаний в течение заданного времени. Концентрацию меди в продуктивном растворе определяли атомно-адсорбционным методом. Изучили влияние концентрации серной кислоты, расхода аминоктановой кислоты и влияние режима «выщелачивание-сушка-выщелачивание» пробы на извлечение меди в продуктивный раствор.

Как и следовало ожидать, при увеличении концентрации серной кислоты в выщелачивающем растворе с 2 до 10% извлечение меди в продуктивный раствор повысилось в

два раза. Однако извлечение было низким и не превышало для хвостов обогащения Сибайской ОФ 4%, для хвостов Хайбуллинской ОФ – 5%.

Добавка аминокетановой кислоты (АЭК) в количестве 0,5-2 г/дм<sup>3</sup> позволила повысить извлечение меди на 0,2-2% из хвостов Сибайской ОФ, на 0,1-1,8% – из хвостов Хайбуллинской ОФ. При этом последующее выщелачивание меди из проб, которые перед этим выщелачивались в присутствии АЭК, было выше, чем в пробах, обработанных только сернокислотным раствором без добавок реагента-комплексобразователя.

Значимая разница по извлечению меди наблюдалась в экспериментах по выщелачиванию в режимах двух последовательных приемов выщелачивания (В-В) и «выщелачивание-сушка-выщелачивание» (В-С-В). На рисунке приведены графики зависимости извлечения меди от концентрации серной кислоты для Сибайских и Хайбуллинских хвостов обогащения в разных режимах выщелачивания. При выщелачивании с промежуточной сушкой пробы в естественных условиях, на открытом воздухе извлечение меди в продуктивный раствор увеличивается.

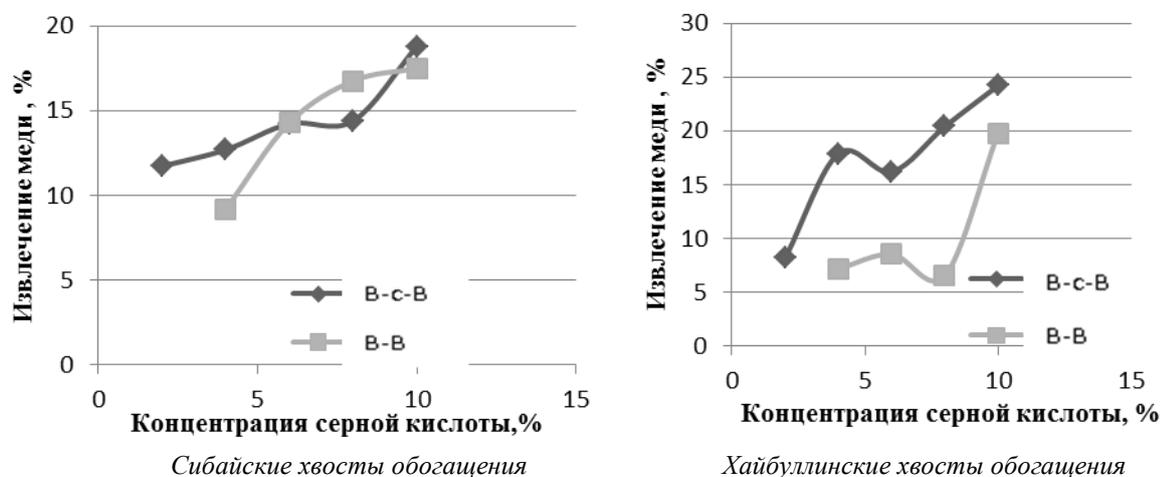


Рисунок Влияние режима выщелачивания хвостов и концентрации серной кислоты в выщелачивающем растворе на извлечение меди

Таким образом, результаты проведенного исследования показали, что степень влияния используемых способов интенсификации на выщелачивание меди из хвостов Сибайской и Хайбуллинской фабрик различна. Максимальное извлечение меди из текущих хвостов обогащения Хайбуллинской фабрики составило 24,2 %.

\*Работа выполнена при поддержке МОиН РФ ГЗ 2014/80

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проблемы и решения переработки тонкодисперсного техногенного цинксодержащего сырья / Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова, О.И. Клебан // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 27-31.
2. Хвостохранилище отходов медноколчеданных руд как техногенный минеральный объект (на примере хвостохранилища УГОКа) / В.А. Ангелов, Е.И. Ангелова, Е.А. Горбатова, Е.А. Емельяненко // Материалы 67-й научно-технической конференции. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – Т.1. – С.141-143.
3. Горбатова Е.А. Минералого-технологическая оценка отходов обогащения колчеданных руд Южного Урала: автореферат дис. ... доктора геолого-минералогических наук: 25.00.05 – Москва, 2013.- 41 с.

## МОДЕЛЬ НАГРЕВА ДИСПЕРСНОЙ ЧАСТИЦЫ ЗОЛОТА В РАЗЛИЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА MATLAB

Федоров С.А., Амдур А.М., Янчурина М.М.  
Уральский государственный горный университет

Экспериментально определить перепад температуры при нагреве теплопроводных частиц микронного размера и время их полного прогрева крайне затруднительно. Поэтому задачу нагрева тела таких размеров, помещенного в среду с определенными свойствами, решали с помощью пакета Matlab.

Цель исследования заключается в построении моделей нагрева дисперсной частицы золота в различных средах (горных породах) и выявлении различий температурных полей в них.

Для построения моделей использовались теплофизические характеристики золота и горных пород, взятые из источников [1-2]. Температура на границах системы для твердой частицы золота - 1000°C, для жидкой – 1300°C. Радиус частицы 60 мкм, размеры среды – 0,96·0,96 мкм.

Пространственное изображение нагрева частицы золота, помещенной в среду, показано на рисунке 1. По осям x и y отложены геометрические размеры, по оси z – температура в градусах Цельсия. На плоскости xOy, показана проекция поверхности нагрева с указанием направлений теплового потока. Длина стрелок характеризует величину теплового потока, линии - изотермы.

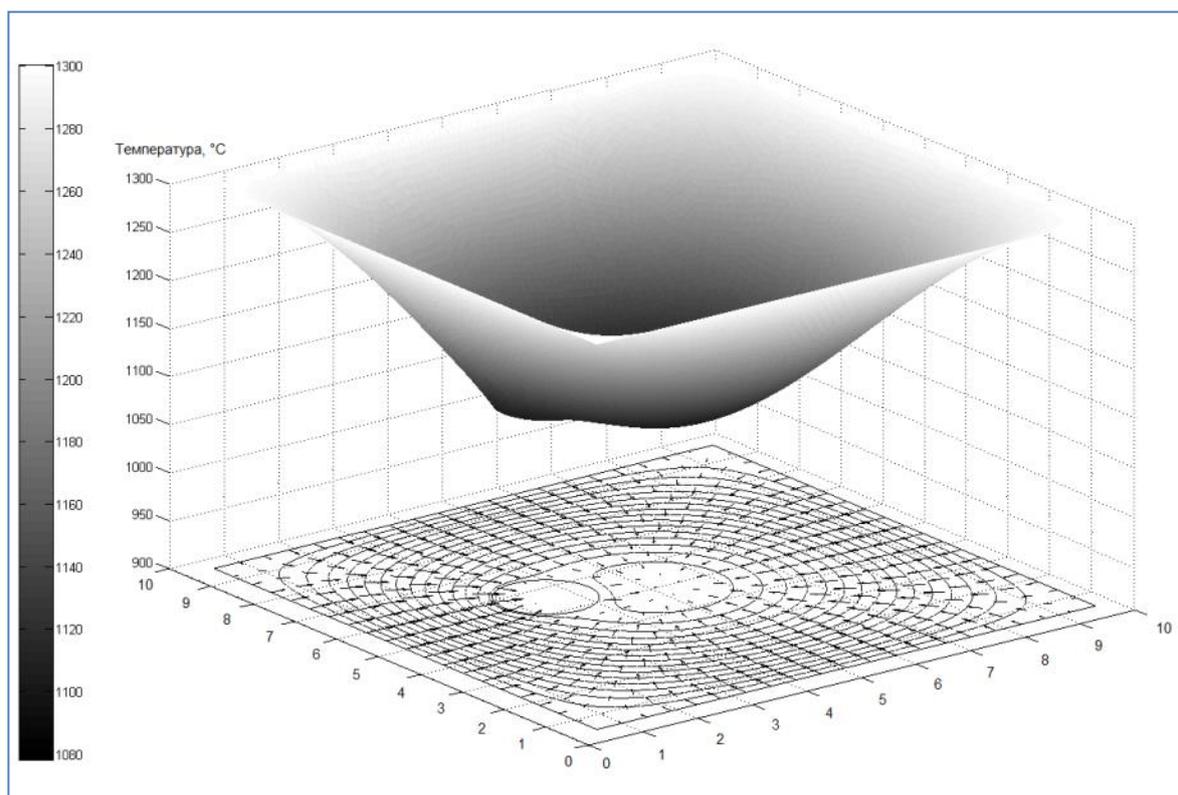


Рисунок 1. Пространственная картина нагрева частицы с теплофизическими характеристиками жидкого золота в пористом кальците в интервале температур 1080-1300°C (коэффициент конвективной теплопередачи 1000).

Моделирование нагрева осуществлялось со всех четырех сторон путем задания температуры на границах среды. Частица золота в виде сферы смещена относительно центра ячейки, поэтому ее нагрев был несимметричным, что позволяло фиксировать перепад температуры по сечению. Кроме того, в центре ячейки в следствии экранированная его частицей появляется деформированная зона изотерм неправильной формы.

Построены и проанализированы модели нагрева частицы золота в четырех различных средах: монолитный кальцит, пористый кальцит, кварц и силикатное стекло. Получены существенные изменения по времени нагрева породы и частицы золота: в монолитном кальците ( $\lambda = 3,5$  Вт/(м К),  $c = 1000$  Дж/(кг К),  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>) центр породы нагрелся до 700°C за 0,05 с, где за это же время центр в пористом кальците ( $\lambda = 0,4$  Вт/(м К),  $c = 1000$  Дж/(кг К),  $\rho = 2160$  кг/м<sup>3</sup>) нагрелся всего лишь до 100°C. Это говорит о сильном влиянии пористости породы на ее нагрев. Разница температур на разных концах частицы небольшая (2,1°C) по сравнению с монолитным кальцитом (2,3°C), но время полного прогрева увеличилось почти на порядок (с 0,68 до 4,0 с). В кварце ( $\lambda = 49,8$  Вт/(м К),  $c = 415$  Дж/(кг К),  $\rho = 2650$  кг/м<sup>3</sup>) самые высокие значения градиента температуры у частицы золота (45°C) и самое низкое время полного нагрева (0,01 с) – он самый приближенный к золоту по теплофизическим характеристикам. Силикатное стекло занимает среднюю позицию по величине градиента температуры и времени полного нагрева между кварцем и кальцитом.

Так же были построены модели нагрева для жидкой дисперсной частицы золота. На рисунке 1 жидкая частица золота помещена в среду с теплофизическими характеристиками пористого кальцита. Градиент температур по ее сечению сохраняется и близок к градиенту для твердой частицы.

Для двух дисперсных частиц золота было проанализировано: как сильно изменяется градиент температуры, когда одна частица золота экранирует другую, и как изменится время полного нагрева. Радиус экранирующей частицы 60 мкм, экранируемой – 57 мкм, расстояние между частицами 8,6 мкм. Наблюдается большая разница между градиентами температуры двух частиц золота: градиент температуры экранирующей частицы в разы превышает градиент экранируемой частицы, а так же превышает градиент одиночной частицы аналогичного радиуса.

По результатам исследования нами были сформулированы следующие выводы:

1. Различия между моделями нагрева частицы золота в одной среде от нагрева в другой среде наблюдаются в величине градиента температуры и времени полного прогрева: если среда имеет низкую теплопроводность и высокую теплоемкость, то градиент температуры будет минимальным, а время полного прогрева – максимальным. Самые высокие значения градиента температуры частицы золота находятся в породах с близкими значениями теплофизических характеристик к характеристикам золота, время прогрева в таких средах, соответственно, очень низкое.

2. Серьезных различий между градиентами температуры частицы золота в породе при нагреве от 0 до 1000°C и от 1100 до 1300°C нет – градиенты практически равны.

3. При увеличении количества частиц золота в среде время полного прогрева уменьшается. Исключение составляют те среды, теплофизические характеристики которых близки к характеристикам золота.

4. При экранировании, градиент температуры той частицы, которая экранируется, снижается в несколько раз по отношению к экранирующей частице. У последней градиент температуры намного выше градиента одиночной частицы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства элементов. Киев: Наукова думка, 1965.
2. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., 1991.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВЛЕННОГО АЛЮМИНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ КВАРЦЕВОГО ОГНЕУПОРА

Апакашев Р.А., Лебзин М.С., Хорева Е. М.  
Уральский государственный горный университет

Кварцевые огнеупоры, используемые в алюминиевой промышленности, характеризуются малым термическим расширением, высокой термостойкостью и низкой теплопроводностью. Плавленные кварцевые огнеупоры получают из расплава природного или синтетического кремнезема, содержащего более 99 %  $\text{SiO}_2$ . Способ отливки позволяет изготавливать кремнеземистые изделия сложных форм. Поэтому применение этих огнеупоров очень разнообразно, в том числе их используют при непосредственном контакте с расплавленным металлом.

Термодинамический анализ реакции в системе  $\text{Al-SiO}_2$  свидетельствует о возможности восстановления кремния из его диоксида расплавленным алюминием [1]. Практическая реализация такого взаимодействия используется при получении алюминиево-кремниевых сплавов вследствие растворения в алюминии кремния, восстановленного из кремнезема [2, 3]. В научной литературе практически отсутствуют сведения о кинетических параметрах высокотемпературного взаимодействия в системе  $\text{Al-SiO}_2$ . Наличие подобной информации позволяет оценить скорость растворения в расплавленном алюминии контактной поверхности кварцевого огнеупора. Тем самым предоставляется возможность учитывать вероятный источник и количество поступления примесных элементов в металлический расплав, а также прогнозировать срок службы огнеупора.

В настоящей работе представлены результаты исследований скорости реакции восстановления кремния из диоксида расплавленным алюминием, а также результаты электронной микроскопии структуры алюминия, контактировавшего в расплавленном состоянии с поверхностью кварцевого огнеупора.

В качестве компонентов модельной системы  $\text{Al-SiO}_2$  использовали первичный алюминий марки А0 (аналог зарубежного материала ENAW-1100) и огнеупорные трубки из плавного кварца оптического качества. Для реализации высокотемпературного контакта компонентов системы  $\text{Al-SiO}_2$  разработано специальное устройство [4].

Устройство [4] использовали для проведения экспериментов при 985 К. В корундовом тигле плавил алюминий. Затем сливали расплав в металлопровод с установленной в нем вставкой из кварца. Время контакта расплава с материалом вставки регулировали дополнительным шиберным затвором. Открыв затвор, сливали расплав в литейную форму для кристаллизации при комнатной температуре. Длину металлопровода с внутренней вставкой из кварца в разных экспериментах варьировали от 50 до 160 мм, внутренний диаметр - от 5 до 10 мм.

Из средней части полученных с помощью установки слитков вырезали цилиндрические образцы высотой 15 и диаметром 20 мм. Структуру образцов исследовали с помощью электронного микроскопа «Quanta 200». Химический состав образцов изучали с помощью приставки рентгеновского микроанализа микроскопа.

В результате исследований установлено, что высокотемпературный контакт алюминия с поверхностью кварцевой трубки сопровождается интенсивным восстановлением кремния из его диоксида. Характерная структура металлического материала, полученного при контакте расплавленного алюминия с внутренней поверхностью кварцевой трубки представляет собой композит из металлической матрицы, наполненной дисперсными частицами кремния.

Преобладающий линейный размер частиц кремния в матрице алюминия составляет 3-5 мкм. Процесс сливания металлического расплава из кварцевой трубки для последующей кристаллизации способствует относительно равномерному распределению частиц кремния в объеме слитка. По результатам рентгеновского микроанализа массовая доля этих частиц в композиционном материале достигает 29,86 %, а содержание кремния в частицах составляет

97,79 %. При этом содержание алюминия в матрице составляет 98,18 %, а содержание растворенного кремния в матричном алюминии - 1,82 %. Отметим, что массовая доля кремния в исходном алюминии марки А0 не более 0,95 %. Превышение этой величины свидетельствует о процессе растворения гетерогенных частиц кремния, образующихся в расплавленном алюминии при восстановлении из SiO<sub>2</sub>. Известно, что процесс растворения твердого кремния в алюминии проходит относительно медленно и, несмотря на гранулометрию, выбранную для вводимого кремния, растворение вполне может продолжаться около 1 ч [5]. По-видимому, способствовать интенсификации процесса может развитая поверхность большого числа микрочастиц кремния, образующихся в результате высокотемпературного взаимодействия компонентов системы Al-SiO<sub>2</sub>.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют оценить среднюю скорость гетерогенной реакции взаимодействия расплавленного алюминия с диоксидом кремния. Соответствующую величину в настоящей работе рассчитывали как отношение количества вещества кремния  $n$ , образовавшегося в ходе реакции, к площади  $S$  контактной поверхности кварцевой трубки и к продолжительности реакции  $t$ .

Рассчитанное подобным образом значение средней скорости реакции при ее протекании в кварцевой трубке диаметром 5 и высотой 50 мм в течение 60 с составляет  $5,7 \cdot 10^{-1}$  моль/(м<sup>2</sup>·с).

Ранее нами показано [6], что взаимодействие алюминия с плавным кварцем разрушает контактирующую с металлическим расплавом поверхность огнеупора. Разрушение отдельных участков поверхности происходит неравномерно, что приводит к появлению выраженного рельефа поверхности огнеупора. По-видимому, соответствующее изменение площади  $S$  контактной поверхности влияет на величину мгновенной скорости реакции, но усредняется при относительно большой длительности гетерогенной реакции.

Установлено, что преобладающий линейный размер частиц кремния и их массовая доля в композиционном материале зависят от длительности высокотемпературного контакта компонентов системы Al-SiO<sub>2</sub>. Так, при длительности высокотемпературного контакта 60 с массовая доля кремния в дисперсных частицах достигает 97,79 %, а массовая доля алюминия в матрице составляет 98,18 %. При этом отмечено частичное растворение восстановленного кремния, повышающее содержание этого элемента в матричном металле.

Полученные результаты позволяют оценить среднюю скорость растворения поверхности кварцевого огнеупора при ее контакте с расплавленным алюминием, а также прогнозировать срок службы огнеупора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рафальский И. В. Термодинамический анализ реакций взаимодействия фаз компонентов литейных сплавов, полученных из алюмоматричных композиций на основе системы Al-SiO<sub>2</sub> / И. В. Рафальский, А. В. Арабей // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9, № 3. С. 375-378.
2. Патент 117439 РФ. Установка для получения алюмоматричных композиционных расплавов и отливок из них / Алимова О. Т., Гришанова М. С., Минаев А. А. № 2012110096; заявл. 16.03.2012; опубл. 27.06.2012.
3. Патент 16558 ВУ. Способ получения алюминиево-кремниевого сплава / Рафальский И. В., Арабей А. В. № а 20101849; заявл. 20.12.2010; опубл. 30.08.2012.
4. Патент 149240 РФ. Устройство для получения литого кремнийсодержащего алюмоматричного композиционного материала / Апакашев Р. А., Давыдов С. Я., Валиев Н. Г. № 2014127377; заявл. 04.07.2014; опубл. 28.12.2014.
5. Патент 2269583 РФ. Производство сплавов типа алюминий - кремний / Тома М. № 2003112624; заявл. 27.09.01; опубл. 10.02.2006.
6. Апакашев Р. А. Образование алюмоматричного композиционного материала при высокотемпературном взаимодействии компонентов системы Al-SiO<sub>2</sub> / Р. А. Апакашев, С. Я. Давыдов // Новые огнеупоры. 2014. № 3. С. 91-93.

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОТВАЛЬНЫХ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД МИХЕЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Емельяненко Е.А., Горбатова Е.А., Колпаков А.С.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Отвальные окисленные медные руды Михеевского месторождения представляют собой практический интерес с позиции их дальнейшей комплексной переработки и получения готовой продукции [1].

Данные руды сложены сцементированными минеральными агрегатами из смеси слоистых силикатов. На рисунке 1 показано, что присутствующие в агрегатах рудные минералы образуют желваки и так называемые «азуриновые ежики» - стяжения, центральная часть которых, сложена плотным агрегатом, покрытым сверху уплощенными кристаллами индигово-синего цвета, а также на поверхности кусков руды наблюдаются разводы, налеты гидроксидов железа и малахита [2].



Рисунок 1 – Окисленные руды Михеевского месторождения

Анализ химического состава окисленной медной руды, представленный в таблице 1, показал, что оксид кремния является основной составляющей, как кварца, так и силикатов. Оксиды кальция, магния и алюминия образуют силикатные минералы, железо встречается в составе силикатных, окисленных и сульфидных минералов.

Таблица 1 - Химический состав окисленных руд Михеевского месторождения

Компоненты	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	S
Количество (%)	54,3	2,59	5,47	18,1	6,44	0,72

Главным промышленно-ценным компонентом окисленной руды является медь, наряду с ней присутствуют такие попутные ценные компоненты, как золото, серебро, молибден и рений. В таблице 2 показано содержание меди в исследованных рудах, которое не превышает 0,35 %.

Таблица 2 - Запасы руды и металлов окисленной руды Михеевского месторождения

Запасы, млн т	Содержание полезных компонентов			
	Cu, %	Mo, %	Au, г/т	Ag
10,8	0,35	0,005	0,15	0,7

По результатам химического фазового анализа медные минералы представлены оксидами – 2%; силикатами – 5%; сульфидами – 6%; карбонатами – 87%.

Минералогическим и рентгеноструктурным анализами установлено, что к нерудным минералам относятся кварц – 53% и слоистые силикаты – каолин – 33%, хлорит – 11% и слюда – 2%. На рудные минералы - малахит, азурит, гидроксиды железа приходится около 1%. В небольшом количестве встречается ковеллин, тенорит и хризокolla. На рисунке 2 приведена дифрактограмма пробы окисленной руды.

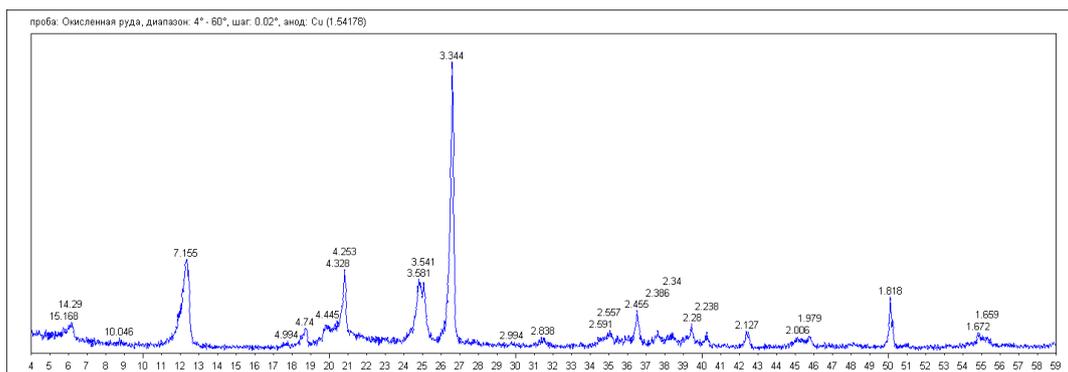


Рисунок 2 - Дифрактограмма пробы окисленных руд

Медьсодержащие минералы в силикатной матрице имеют разную морфологию. Ковеллин совместно с пиритом встречается в виде небольших обломков минеральных агрегатов (0,1 мм) исходной сульфидной руды. Карбонаты меди образуют стяжения овальной и округлой формы. Размер стяжений достигает 2 см в диаметре. Тенорит и хризоколла совместно с малахитом и азуритом выполняют полости трещин и встречаются в виде корочек и примазок [3].

Таким образом, промышленный интерес представляют медьсодержащие минералы и каолин. Минералогические особенности окисленной медной руды требуют особого подхода для их переработки. Традиционный способ обогащения – флотация весьма затруднителен, в связи с повышенным содержанием глинистой составляющей. Необходим комплексный подход к переработке сырья, учитывающий не только ценность меди, но и хвостов обогащения, содержащих каолин. Применение нетрадиционных технологий для отвальных окисленных медных руд позволит вовлечь получать рудные концентраты и каолиновое сырье.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Король Ю.А. Освоение медно-порфировых месторождений продлит медный век Урала до 100 лет [Электронный ресурс]: URL: <http://www.acexpert.ru/archive/27-563/osvoenie-medno-porfirovih-mestorozhdeniy-prodlit-m.html> (дата обращения 07.10.15).
2. Бетехтин, А.Г. Курс минералогии [Текст]/ А.Г. Бетехтин. - М.: Книжный дом "Университет", 2008. - 721 с.
3. Афанасьева, Е.Л. Технологическая минераграфия [Текст]/ Е.Л. Афанасьева, М.П. Исаенко. — М.: Недра, 1988. — 226 с.

## РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ОТВАЛЬНЫХ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД МИХЕЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Емельяненко Е.А., Горбатова Е.А., Колпаков А.С.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

В настоящее время осваивается молибден-медно-порфировое Михеевское месторождение, расположенное в 20 км к северо-востоку от города Карталы Варненского района Челябинской области. Эксплуатационные запасы месторождения составляют около 400 млн. тонн из них 10,8 млн. т представлены окисленными рудами [1].

Сульфидная руда поступает на флотационное обогащение, а окисленные руды, являясь некондиционными, складированы в отвалы, где подвергаются гипергенезу и претерпевают качественные изменения. Геохимическая миграция элементов (Ni, Co, Cr, Mn, V, Ti, Cu, Zn, Pb, Mo, Ba, Sr), входящих в состав окисленных медных руд под действием гипергенеза оказывает угнетающее воздействие на экотоп горнотехнической системы "Михеевского ГОКа".

В тоже время окисленные руды Михеевского месторождения являются крупным резервом сырья для извлечения рудных и промышленных минералов. Поэтому проблема своевременной переработки этих руд с учетом строения и вещественного состава весьма актуальна.

В лабораториях университета изучены следующие технологические свойства отвальных окисленных руд. Исследования физико-механических свойств окисленной медной руды Михеевского месторождения, представленные в таблице 1, показали, что средняя плотность руды составляет 2,04 г/см<sup>3</sup>, среднее значение естественной влажности - 2,54%. По числу пластичности руду можно отнести к умереннопластичным.

Таблица 1 – Физико-механические свойства окисленных руд

Физико-механические свойства	Значение
Естественная влажность, %	0,90 – 2,07
Граница текучести	35,5
Граница пластичности, %	20,7
Число пластичности	14,8
Показатель текучести	-1,31
Водопоглощение, %	9,24
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,9 – 2,1
Пористость, %	26
Коэффициент водонасыщения	0,10

Основная задача, решаемая при изучении возможности вовлечения в переработку некондиционных окисленных медных руд малоотходной, экологически щадящей технологией, состояла в отделении рудных минералов от нерудных, а нерудных в разделении глинистой фракции и кварцевого песка.

Отделение нерудной фракции (99% от общего объема рудно-породной массы, складированной в отвалах) от окисленной медной руды позволит решить 2 важные задачи - получение медных минералов и минерального сырья, пригодного после доведения до кондиции для изготовления строительных смесей.

Наибольший интерес представляет каолин, который характеризуется инертностью по отношению к кислым и щелочным растворам, высокой огнеупорностью, способностью образовывать с водой пластичную массу (пластичные разности), высокой механической прочностью в сухом состоянии, белым цветом обожженного черепка. Эти свойства определяют применение каолина в качестве сырья для производства тонкой, хозяйственной, санитарной, электро- и радиокерамики, огнеупорных изделий, силумина, стекла, ультрамарина и солей алюминия. Высокая дисперсность, белый цвет, диэлектрические свойства, химическая

инертность хорошая диспергируемость, смачиваемость определяют широкое использование каолинов в качестве универсального наполнителя при производстве бумаги, резинотехнических, кабельных, пластмассовых и парфюмерных изделий [2].

Термографическим анализом установлено, что каолин представлен глинистыми гипергенными и, в меньшей степени, тонкодисперсными реликтовыми минералами (пылеватые кварц, полевой шпат, тонкочешуйчатый серицит). Ведущее значение имеют каолиновые минералы, с которыми в разнообразных сочетаниях и варьирующих количествах ассоциируют гидрослюды, смешанослойные, монтмориллонит. Присутствие в каолинах свыше 10 % некаолиновых глинистых минералов оказывает существенное влияние на технологические особенности получаемого из них обогащенного каолина. Ценные свойства каолинов обусловлены ведущей ролью в их составе минералов группы каолинита, к которым отнесены каолинит, галлуазит, диккит и накрит. По вещественно-структурным признакам все они являются полиморфными модификациями водного силиката алюминия  $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ , чему соответствует содержание  $SiO_2$  46,54 %;  $Al_2O_3$  39,5 %;  $H_2O$  13,96 %.

В результате исследований установлено, что нерудная составляющая окисленных медных руд, характеризуется, как низкосортное каолиновое сырье гипергенного происхождения. В основе экологически щадящей технологии переработки данного сырья - обогащение каолина и извлечение меди из карбонатных минералов с использованием гидрохимического обогащения.

Исследования по обогащению каолина ведутся мокрой схеме обогащения, по схеме, применяемой на Кыштымском комбинате, а выделенная фракция карбонатов меди подвергается специальной обработке, при которой в раствор переходит до 99 % меди, из которого далее может быть выделена в виде катодной меди или медных солей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Король Ю.А. Освоение медно-порфировых месторождений продлит медный век Урала до 100 лет [Электронный ресурс]: URL: <http://www.acexpert.ru/archive/27-563/osvoenie-medno-porfirovih-mestorozhdeniy-prodlit-m.html> (дата обращения 07.10.15).
2. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых Каолин // URL: <http://www.gkz-rf.ru/> (дата обращения 29.10.15).
3. Бетехтин, А.Г. Курс минералогии [Текст]/ А.Г. Бетехтин. - М.: Книжный дом "Университет", 2008. - 721 с.