

УДК 622.7

# ПРИМЕНЕНИЕ ПОТЕНЦИОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДНЫХ РУД НА ПРИМЕРЕ ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**К. М. АРУСТАМЯН**<sup>1</sup>, заведующий лабораторией новых методологий во флотационном процессе

**С. А. РОМАНЕНКО**<sup>1</sup>, ведущий инженер-технолог, S\_Romanenko@rivs.ru

**А. М. АРУСТАМЯН**<sup>2</sup>, главный инженер проекта

<sup>1</sup> ЗАО «НПО «РИВС», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> АО «ГипроРИВС», Санкт-Петербург, Россия

## Введение

Исследование руд на обогатимость является сложнейшей задачей с рядом неизвестных и требует сопоставления многих, часто противоречащих друг другу данных. Традиционно при решении этой задачи используется метод аналогий, суть которого сводится к поиску на основе априорной информации решения, уже проверенного в аналогичной ситуации. Однако обогатительные фабрики, как правило, уникальны, что связано прежде всего с уникальностью руды любого месторождения. Природа не повторяется и оставляет всегда значительную долю неопределенности результата обогащения даже при весьма полной априорной информации. Поэтому основным средством решения задачи оценки обогатимости руды в конечном счете становится эксперимент [1].

Сложность и многообразие рудных объектов, схем и методов обогащения неизбежно влекут за собой увеличение масштабов исследований на обогатимость в условиях временных и финансовых ограничений. Практика аналогий опирается также на попытки увязать генетическую и обогатительную классификацию месторождений. Основным звеном в исследованиях на обогатимость является комплекс предварительных исследований, который включает минералогический, фракционный, гранулометрический анализ руды, а также изучение физических свойств входящих в руду минералов.

При прогнозировании месторождений полезных ископаемых тоже используется принцип аналогии, который базируется на сходстве условий залегания, строения, и масштаба месторождений, сформированных в близких геологических условиях. В работах [2, 3] отмечается, что при поиске связи геолого-минералогических особенностей месторождения с результатами процесса флотации, кроме вещественных характеристик руд (минерального, химического, гранулометрического состава и текстурно-структурных свойств), влияние оказывают электрохимические свойства рудных минералов. Более того, эти свойства играют одну из основных ролей в процессах переработке руд. Установлено, что труднообогатимые руды характеризуются:

- большим диапазоном изменения электрофизических свойств одних и тех же минералов, а следовательно, их различными флотационными свойствами;

Показано, что построение потенциограмм, фиксируемых с помощью различных электродных систем, позволяет количественно оценить электрохимические параметры пульпы, выявить факторы, отрицательно влияющие на технологический процесс.

**Ключевые слова:** флотация, потенциограмма, электрохимические параметры пульпы, комплексобразование, медные руды, окисленные медные руды.

**DOI:** dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.12

- присутствием в рудах сростков минералов с резко различными электрофизическими свойствами, формирующими естественные микрогальванические элементы в потенциалообразующих средах (доступ воды, кислорода); эти элементы работают с протеканием электрохимических реакций, что приводит к образованию вторичных минералов;

- наличием большого количества минералов, образующих естественные гальванические элементы в связи с протеканием в активных средах электрохимических реакций.

Вопрос о крайней важности пересмотра существующих классификаций для гидротермальных месторождений поднимался еще в середине 1960-х годов [4]. В публикации отмечалось, что для обогатителей в такой скорректированной классификации очень важно было бы привести всестороннюю характеристику минералов: крупность кристаллизации; зависимость параметров решетки от условий кристаллизации и образования минералов; характера, состава и формы присутствующих в каждом минерале примесей; состава и характера сопутствующих минералов и вмещающих пород, возможных изоморфных замещений, степени окисленности поверхности и других особенностей.

В условиях постоянной изменчивости типа перерабатываемой шихты на горно-обогатительном предприятии при создании системы технологической классификации в режиме реального времени необходимо постоянно увеличивать, обрабатывать и анализировать полученную информацию. Применяемые авторами данной статьи потенциограммы, фиксирующие электрохимические параметры пульпы с помощью электродов, непосредственно установленных в пульпе, преследуют цель расширить информационную базу при диагностике технологических свойств исследуемой руды. Важность методов электрохимического контроля, как инструмента получения дополнительной информации, подчеркивается во многих литературных источниках [5–12].

Ниже приведены результаты исследования медных руд, перерабатываемых на Жезказганской обогатительной фабрике в Ка-

**Таблица 1. Химический состав руд Жезказганского месторождения, %**

| Химические элементы и соединения | ВЖР   | ЮЖР    | СЖР    | Жомарт | Жиланды |
|----------------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|
| Cu                               | 0,8   | 0,78   | 0,68   | 1,71   | 1,38    |
| Zn                               | 0,007 | 0,01   | 0,012  | 0,014  | <0,01   |
| Pb                               | 0,002 | 0,0043 | <0,006 | 0,024  | 0,0036  |
| Fe <sub>общ</sub>                | 2,69  | 2,7    | 2,94   | 2,06   | 2,44    |
| S <sub>общ</sub>                 | 0,26  | 0,40   | 0,24   | 0,43   | 0,48    |
| SiO <sub>2</sub>                 | 66,76 | 66,4   | 69,4   | 62,2   | 63,9    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 10,59 | 11,06  | 11,97  | 10,2   | 11,28   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 3,85  | 3,87   | 4,2    | 3,02   | 3,48    |
| CaO                              | 3,25  | 2,44   | 0,42   | 5,2    | 5,48    |
| K <sub>2</sub> O                 | 1,43  | 1,59   | 1,89   | 1,66   | 1,45    |
| Na <sub>2</sub> O                | 3,34  | 3,27   | 3,4    | 3,39   | 3,66    |
| MgO                              | 0,54  | 0,65   | 0,9    | 0,4    | 0,56    |
| Ba                               | 1,2   | 0,94   | 1,63   | 1,11   | 1,35    |
| MnO                              | 0,15  | 0,15   | 0,09   | 0,19   | 0,17    |
| C <sub>общ</sub>                 | 0,88  | 0,84   | 0,16   | 1,34   | 1,44    |
| CO <sub>2</sub> карб             | 3,12  | 3      | 0,48   | 4,64   | 4,22    |
| Au*                              | <0,1  | <0,1   | <0,1   | <0,1   | <0,1    |
| Ag*                              | 13,8  | 14,37  | 11,91  | 11,99  | 24,2    |

\* Содержание указано в г/т.

**Таблица 2. Минеральный состав руд Жезказганского месторождения, % (вес.)**

| Проба руды   | ЮЖР  | ВЖР  | СЖР  | Жомарт | Жиланды |
|--|------|------|------|--------|---------|
| Халькозин (дигенит), ковеллин                      | 0,6  | 0,7  | 0,1  | 0,6    | 1       |
| Борнит   | 0,2  | 0,4  | 0,09 | 1,2    | 0,7     |
| Халькопирит  | 0,3  | 0,05 | 0,5  | 1,2    | 0,1     |
| Кислородные минералы меди                          | —    | —    | 0,5  | —      | —       |
| Пирит  | —    | —    | —    | 0,5    | —       |
| Другие (сфалерит, пирит, галенит, теннантит и др.) | 0,7  | 0,45 | 0,31 | 0,1    | 0,2     |
| Оксиды и гидроксиды железа                         | 3    | 3    | 4    | 4      | 3,7     |
| Сумма рудных минералов                             | 4,8  | 4,6  | 5,5  | 7,6    | 5,7     |
| Кварц  | 37   | 39   | 39,5 | 34     | 32      |
| Глинисто-слюдястые минералы                        | 17   | 15   | 19   | 9,5    | 13      |
| Полевые шпаты                                      | 29   | 29   | 30   | 34,5   | 36      |
| Карбонаты (кальцит)                                | 7    | 7    | 0,8  | 10,2   | 9       |
| Другие силикаты (хлорит)                           | 4    | 4    | 4    | 2,5    | 3       |
| Барит  | 0,3  | 0,5  | 0,2  | 1      | 0,5     |
| Угlistое вещество                                  | —    | —    | —    | 0,1    | 0,3     |
| Другие (апатит, рутил и др.)                       | 0,9  | 0,9  | 1    | 0,6    | 0,5     |
| Сумма нерудных минералов                           | 95,2 | 95,4 | 94,5 | 92,4   | 94,3    |
| Сумма  | 100  | 100  | 100  | 100    | 100     |

захстане. На фабрику поступает руда с пяти участков (рудников) Жезказганского месторождения: Восточного (ВЖР), Южного (ЮЖР), Северного (СЖР), Жомарт и Жиланды. Со всех них были взяты соответствующие пробы руды.

**Методика и результаты исследования**

В начале по отобранным пробам был изучен химический и минеральный состав руд месторождения (табл. 1, 2) и осуществлен фазовый анализ меди (табл. 3).

Основными сульфидными минералами меди в рудах являются сульфиды халькоцитной группы Cu<sub>(2-x)S</sub>, варьирующиеся по составу от ковеллина и халькоцита до дигенита (Cu<sub>9</sub>S<sub>5</sub>) и джирита (Cu<sub>8</sub>S<sub>5</sub>) с борнитом и халькопиритом. Халькопирит, как правило, образует частицы с борнитом и показывает переходную зону в составе между ними. Медные сульфиды, главным образом халькоцит, имеют явно окисленные края. Наблюдаются замещения халькозина борнитом, пирита халькопиритом, и развитие коррозионных процессов. Оксидные медные минералы растворяются в превалирующих окислительных условиях, повышая содержание ионов меди в пульпе. Химический анализ водной вытяжки исследуемых проб руды подтверждает присутствие катионов Cu<sup>2+</sup> в количестве 0,12–0,2 мг/дм<sup>3</sup>.

Формально по приводимым таблицам можно получить небольшую информацию о возможном различии флотационных свойств испытываемых проб. Руда участка Жомарт наиболее богата по содержанию сульфидов меди, но, по имеющейся информации, существуют проблемы получения бедных хвостов при ее флотации согласно принципу аналогий по традиционным режимам. Пробы ВЖР и ЮЖР близки по данным приводимых анализов, и объяснить более худшую обогатимость последней затруднительно. Согласно технологической инструкции фабрики, по содержанию окислов до 12,5 % (отн.) все руды, кроме СЖР, относятся к сульфидному сорту. Содержания в рудах оксидов и гидроксидов железа практически одинаковое по всем изученным пробам и, как правило, специалисты в данном случае не придают данному факту большого значения. Однако содержащиеся в рудах гидроксиды железа, особенно гётитные типы железных оксидов, являются основным источником соединений типа [Fe(OH)]<sup>+</sup>, поглощающих вводимый в пульпу ксантогенат, образуя комплекс [Fe(OH)X]<sup>-</sup>. Дополнительным негативным фактором образования гидроксидных соединений является способность последних к десорбции сорбителя с поверхности сульфидных минералов [13].

Следующим этапом исследования явилось изучение электрохимических свойств минералов. Методика определения электрохимических параметров исходной пульпы, разработанная специалистами ЗАО НПО «РИВС», основывается на выявлении негативных факторов, влияющих на технологический процесс. На рис. 1 представлена потенциограмма, сопоставляющая тренды изменения потенциалов аргентитового и мембранного электродов (далее Ag<sub>2</sub>S и EM соответственно) на пробе руды СЖР, измельченной до крупности 85 % класса –74 мм.

По показаниям Ag<sub>2</sub>S электрода исходная пульпа уже содержит катионы Cu<sup>2+</sup> [14]. При включении азрации пульпы концентрация

Таблица 3. Фазовый анализ меди руд Жезказганского месторождения, % (масс.)

| Форма нахождения металла          | ВЖР       | ЮЖР        | СЖР         | Жиланды     |
|-----------------------------------|-----------|------------|-------------|-------------|
| Си первичных сульфидов            | 0,02/3,01 | 0,11/14,15 | 0,2/28,99   | 0,02/1,45   |
| Си вторичных сульфидов            | 0,7/87,72 | 0,61/79,01 | 0,137/20,29 | 1,268/92,02 |
| Си связанных окисленных минералов | 0,02/2,01 | 0,01/1,65  | 0,03/4,35   | 0,03/2,18   |
| Си свободных окисленных минералов | 0,06/7,27 | 0,04/5,19  | 0,317/46,38 | 0,06/4,35   |
| Си общая                          | 0,8/100   | 0,77/100   | 0,68/100    | 1,38/100    |

Примечание. В числителе — абсолютное значение, в знаменателе — относительное.

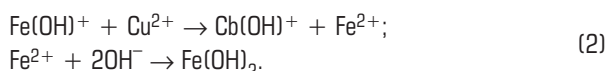
катионов  $\text{Cu}^{2+}$  в пульпе увеличивается на несколько порядков. Потребовался значительный расход ксантогената, чтобы временно нейтрализовать катионы меди:  $\text{Cu}^{2+} + 3\text{X}^- \rightarrow \text{CuX} + \text{X}_2 + \text{e}^-$ . Но затем наблюдается снижение концентрации свободных ионов собирателя до нулевых значений, которые фиксируются по фоновым потенциалам пленочного мембранного ионоселективного электрода EM. Развитие остаточной концентрации в пульпе катионов  $\text{Cu}^{2+}$  контролируется  $\text{Ag}_2\text{S}$ -электродом. Таким образом, выявлен медный фактор, позволяющий количественно оценить электрохимические свойства пульпы исследуемой пробы.

Построение диаграммы зависимости между потенциалами  $\text{Ag}_2\text{S}$  и Pt (платинового) электродов позволяет установить наличие в пульпе гидроксокомплексных соединений железа  $\text{Fe}(\text{OH})^+$ . Отклонение зафиксированных наблюдений от линии электрохимической модели, описывающей соотношение потенциалов аргентинового и платинового электродов при титровании сернистым натрием в дистиллированной воде [15]:

$$\text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S}) = -208 + \text{Eh}(\text{Pt}), \text{ мВ}, \quad (1)$$

свидетельствует о присутствии в пульпе соединения типа  $\text{HS}^-$  или  $\text{Fe}(\text{OH})^+$ . При использовании модели (1) диагностика происходит следующим образом: неравенство  $\text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S}) > \text{Eh}(\text{Pt}) - 208$  означает, что в пульпе присутствуют гидроксокомплексные соединения железа  $\text{Fe}(\text{OH})^+$ ; переход неравенства на противоположный знак свидетельствует о присутствии в пульпе  $\text{HS}^-$ -ионов. Так, фиксируемые электрохимические потенциалы для руд СЖР соответствуют неравенству, при котором диагностируются гидроксокомплексы железа.

В ходе агитации пульпы без доступа воздуха наблюдается нейтрализация комплексов  $\text{Fe}(\text{OH})^+$  катионами  $\text{Cu}^{2+}$  в соответствии со следующими реакциями:



Отмеченная реакция нейтрализации  $\text{Fe}(\text{OH})^+$  подтверждается смещением электрохимического потенциала  $\text{Ag}_2\text{S}$ - и Pt-электрода в положительную область.

Наблюдения, зафиксированные после подачи ксантогената, показывают недостижимость области, отмеченной линией электрохимической модели, описывающей оптимизацию подачи ксантогената [14]:

$$\text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S}) = -240 + \text{Eh}(\text{Pt}), \text{ мВ}, \quad (3)$$

описывающей оптимальный уровень потенциалов  $\text{Ag}_2\text{S}$ - и Pt-электродов при окислении ионов ксантогената до диксантогената, обеспечивающего полную флотацию сульфидных минералов. Зафиксированные наблюдения для руд СЖР удовлетворяют неравенству  $\text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S}) > -240 + \text{Eh}(\text{Pt}), \text{ мВ}$ , что указывает на недостаточный уровень концентрации ксантогената для окисления его до диксантогената.

Отмеченный в ходе исследовательских работ позитивный эффект операции предварительной азрации при пульпоподготовке также не обеспечивает полную нейтрализацию гидроксидных соединений  $\text{Fe}(\text{OH})^+$ , а следовательно, не предотвращает образование комплексов  $[\text{Fe}(\text{OH})\text{X}]^-$  в пульпе. Нормальное поглощение ксантогената диагностируется с помощью калибровочной линейной модели, определяющей соотношение между потенциалами  $\text{Ag}_2\text{S}$ - и EM-электродов в чистых растворах бутилового ксантогената:

$$\text{Eh}(\text{EM}) = 300 + 0,993\text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S}), \text{ мВ}. \quad (4)$$

Наблюдения, отмеченные в результате исследований руд СЖР, лежат в области, удовлетворяющей неравенству  $\text{Eh}(\text{EM}) \ll 300 + 0,993\text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S})$ , что подтверждает ненормальное поглощение собирателя и, как следствие, его комплексобразование и образование соединений типа  $[\text{Fe}(\text{OH})\text{X}]^-$ . Дополнительное негативное влияние оказывают катионы меди, что выражено отсутствием смещения электрохимического потенциала EM-электрода при первых трех дозировках ксантогената. Смещение потенциалов EM-электрода

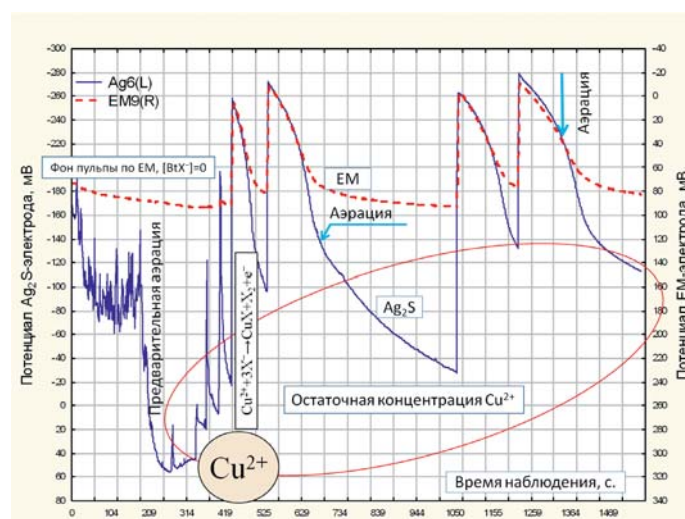
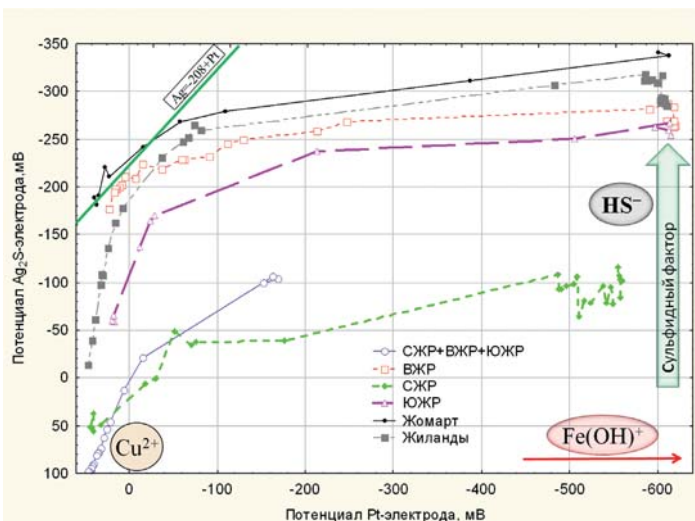
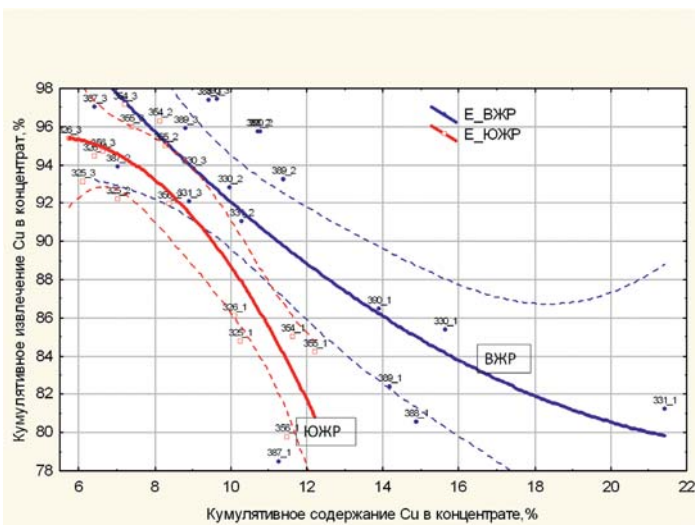


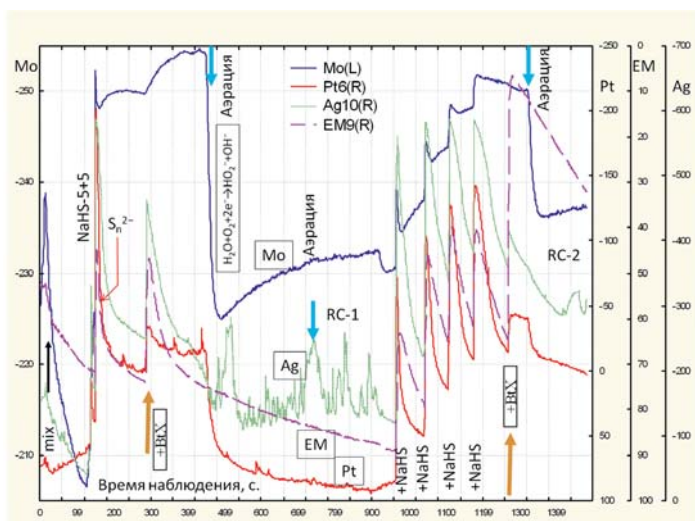
Рис. 1. Потенциограмма, фиксирующая кинетику изменения электрохимических параметров, на пробе руды СЖР



**Рис. 2. Зависимость между потенциалами  $Ag_2S$ - и  $Pt$ -электродов при наблюдении электрохимических трендов на пробе СЖР**



**Рис. 3. Кривые обогатимости, полученные при постановке флотационных опытов на пробах руды ВЖР и ЮЖР**



в отрицательную область проявляется только при 4-й и 5-й дозировках ксантогената, при этом расход собирателя был увеличен более чем в 2 раза.

Обобщенная сравнительная оценка электрохимических характеристик сразу по всем испытуемым пробам представлена на **рис. 2** в виде плоскости в координатах « $Ag_2S - Pt$ ».

Исследовались также электрохимические параметры шихты, составленной из смеси руд: ВЖР (36 %) + ЮЖР (44 %) + СЖР (20 %).

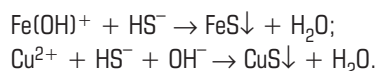
Для проб участков Жомарт, Жиланды и ВЖР отмечено развитие сульфидного фактора в результате протекания процессов электрохимического окисления [16]:



и комплексов типа  $[Me(HS)_3]$ .

При этом резкое смещение потенциалов EM-электрода в отрицательную область после подачи ксантогената свидетельствует об образовании в пульпе металлсульфидных комплексов ксантогената  $[Me(HS)_2X]^-$ .

По приведенным кривым на рис. 2 для проб руды ВЖР и ЮЖР можно сделать сравнительную оценку электрохимических параметров и объяснить причины более худшей обогатимости пробы ЮЖР по сравнению с пробой ВЖР. При более сильном сульфидном факторе на пробе ВЖР после проведения азрационной пульпоподготовки отмечается смещение наблюдений в область линии электрохимической модели (1), когда в пульпе уже отсутствуют комплексы типа  $Fe(OH)^+$  и нейтрализуются катионы меди:



Наблюдения, полученные при исследовании руд ЮЖР, после проведения предварительной операции азрации (как и в случае с рудами СЖР) лежат в области, удовлетворяющей неравенству  $Eh(EM) < 300 + 0,993Eh(Ag_2S)$ , что указывает на развитие медного фактора и образование комплексов  $[Fe(OH)X]X^-$ .

При рассмотрении результатов по пробе ВЖР наблюдается другая ситуация. При подаче в пульпу ксантогената наблюдаемое соотношение электрохимических потенциалов EM- и  $Ag_2S$ -электродов удовлетворяет уравнению (4), что указывает на нормальное поглощение собирателя и отсутствие комплексобразования типа  $[Fe(OH)X]X^-$ .

Таким образом, установленное различие значений диагностических факторов: медного, сульфидного и гидроксидных соединений железа, обосновывает полученные экспериментально кривые обогатимости, представленные на **рис. 3**. Кривые обогатимости, построенные с учетом доверительных интервалов, подтверждают статистически значимую разницу в обогатимости проб ВЖР и ЮЖР.

**Рис. 4. Потенциограмма кинетики изменения электродных потенциалов при проведении двух флотационных операций в межцикловом контуре технологической схемы на смеси жезказганских руд (ВЖР + ЮЖР + СЖР)**

На пробе руды участка Жиланды проявляется фактор катионов  $\text{Cu}^{2+}$  и отмечается также развитие процессов образования гидроксокомплексов железа  $\text{Fe}(\text{OH})^+$  и сульфидный фактор. В отличие от этого, на пробе руды участка Жомарт не проявляется фактор катионов  $\text{Cu}^{2+}$ , но сильно развиты процессы образования гидроксокомплексов железа  $\text{Fe}(\text{OH})^+$  и сульфидный фактор.

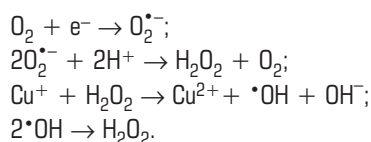
Интересно отметить, что смесь руд должна иметь лучшую обогатимость, так как в смеси руд происходит нейтрализация  $\text{Fe}(\text{OH})^+$  катионами  $\text{Cu}^{2+}$ , которые в повышенном количестве имеются в исходной жидкой фазе. На кривой, отражающей изменение электрохимических параметров на пробе из смеси руд, не наблюдается сильного смещения потенциалов платинового электрода в отрицательную область (см. рис. 2).

На последнем этапе исследования изучался вопрос оптимизации реагентного режима с учетом выявленных негативных факторов.

С учетом полученных результатов при исследовании электрохимических параметров представленных проб руды, на смеси жезказганских руд был поставлен опыт с применением комплекса катионов меди и дробной подачи гидросульфида натрия по всем флотационным операциям. Для примера на рис. 4 приведена потенциограмма, зафиксированная при проведении межцикловых операций.

При подаче  $\text{NaHS}$  до дозирования ксантогената, фиксируется смещение потенциалов  $\text{EM}$ -электрода в отрицательную область, что может быть объяснено только образованием в пульпе полисульфидных ионов  $\text{Sn}^{2-}$  и свидетельствует о передозировке сульфидизатора в первой операции, предназначенной для флотации сульфидов меди. Динамика колебаний потенциалов  $\text{Ag}_2\text{S}$ -электрода перед второй операцией флотации отличается от динамики изменения потенциалов  $\text{Ag}_2\text{S}$ -электрода перед первой операцией флотации, поскольку отражает смысл глубокой сульфидизации поверхности окисленных медных минералов.

Отмеченное на потенциограмме резкое повышение окислительно-восстановительных потенциалов при включении аэрации пульпы (рис. 4) можно объяснить протеканием окислительно-восстановительных процессов в присутствии медных и железных ионов при кислом pH, в результате которых в пульпе образуется супероксидный анион-радикал, и наблюдается существенное повышение концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$ , которая является сильным окислителем [17]:



На основе новой априорной информации был проведен опыт, в котором были учтены и компенсированы выявленные негативные факторы. Кривые обогатимости по опытам с базовым и новым режимами представлены на рис. 5, а показатели, полученные в ходе проведения сравнительных опытов — в табл. 4.

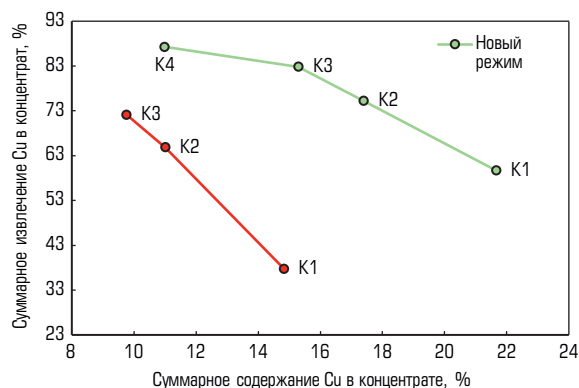


Рис. 5. Кривые обогатимости, достигнутые в опыте по новому режиму, по сравнению с традиционным режимом

Таблица 4. Технологические результаты опытов


| Режим        | Продукт | Суммарный выход, % | Суммарное содержание Cu, % | Суммарное извлечение Cu, % |
|--------------|---------|--------------------|----------------------------|----------------------------|
| Традиционный | K1      | 1,57               | 14,83                      | 37,75                      |
|              | K2      | 3,63               | 11,01                      | 64,86                      |
|              | K3      | 4,55               | 9,76                       | 72,12                      |
|              | Питание | 100                | 0,62                       | 100                        |
| Новый        | K1      | 2,04               | 21,66                      | 59,68                      |
|              | K2      | 3,2                | 17,4                       | 75,21                      |
|              | K3      | 4,01               | 15,29                      | 82,84                      |
|              | K4      | 5,88               | 10,99                      | 87,28                      |
|              | Питание | 100                | 0,74                       | 100                        |

Из данных рис. 5 и табл. 4 следует однозначный вывод о достижении более высоких технологических показателей при новом режиме, сформированном на основании полученных потенциограмм при исследовании представленных проб. Прирост извлечения меди в суммарный концентрат составил 15,17 % при сопоставимом качестве.

### Выводы

Таким образом, на примере медных руд Жезказганского месторождения показано, что построение потенциограмм, фиксируемых с помощью различных электродных систем, позволяет количественно оценить значение электрохимических параметров пульпы, выявить факторы, отрицательно влияющие на технологический процесс. К таким факторам можно отнести: образование в пульпе гидроксидных соединений железа, катионов меди, сульфидных анионов и комплексообразование ионов вводимого сульфидрильного собирателя. Оценка полученных результатов с помощью электрохимических методов контроля позволяет выявить оптимальные направления исследований для достижения лучших технологических показателей.

**Библиографический список**

1. Козин В. З. Исследование руд на обогатимость : учеб. пособие. — Екатеринбург : Изд.-во УГГУ, 2008. — 312 с.
2. Титов Д. В. Использование геофизических методов для оценки технологических свойств руд колчеданно-полиметаллических месторождений // Известия Томского политехнического университета. 2006. Вып. № 4. Т. 309. С. 40–47.
3. Титов Д. В. Разработка комплекса геофизических методов для оценки технологических свойств руд (на примере колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая) : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Томск, 2006. — 119 с.
4. Глембоцкий В. А., Дмитриева Г. М. Влияние генезиса минералов на их флотационные свойства. — М. : Наука. 1965. — 110 с.
5. Xumeng Chen, Yongjun Peng, Dee Bradshaw. Effect of regrinding conditions on the flotation of sulphide minerals in the cleaner stage // International Mineral Processing Congress. 2014. Chapter 2. P. 11–22.
6. Plackowski C., Nguyen A. V., Bruckard W. J. Surface species, roughness and hydrophobicity of enargite under electrochemically-controlled oxidation // International Mineral Processing Congress. 2014. Chapter 2. P. 96–105.
7. Alireza Javadi Nooshabadi, Kota Hanumantha Rao. A new insight into oxidation mechanisms of sulphide minerals // International Mineral Processing Congress. 2014. Chapter 2. P. 106–115.
8. Laskowski J., Castro S. Flotation in highly concentrated electrolyte solution // International Mineral Processing Congress. 2014. Chapter 3. P. 1–12.
9. Etelapaa M., Petrov A. V., Romanenko S. A. et al. New approach to regulating the flotation process of selecting sulfide minerals from pyrite in a lime environment // International Mineral Processing Congress. 2012. Book 2. — 680 p.
10. Бочарова В. А., Игнаткина В. А. К вопросу изучения влияния генетических особенностей разновидностей пирита и его структурных ассоциаций на контрастные и технологические свойства // Цветные металлы. 2014. № 8. С. 20–27.
11. Машевский Г. Н., Романенко С. А. Опыт компании Outotec в разработке технологий флотации руд цветных металлов // Обогащение руд. 2014. № 3. С. 20–27.
12. Дмитриевич И. Н., Пругло Г. Ф., Федорова О. В., Комиссаренков А. Физико-химические методы анализа. Ч. I. Электрохимические методы анализа : учеб. пособие для студентов заочной формы обучения. — СПб., 2014. — 78 с.
13. Машевский Г. Н., Кокорин А. М. Разработка научных основ совершенствования технологии и создания алгоритмической базы для компьютерного управления флотацией руд месторождения «Эрдэнэтийн Овоо» с целью улучшения рентабельности производства // Новые решения в технике, технологии добычи, переработки руды на СП «Эрдэнэт» : сб. докл. научно-технического совета СП «Эрдэнэт» 18–19 июня 1998 г. Типография Компании «Эрдэнэт концерн», 1998. С. 87–101.
14. Машевский Г. Н. Разработка научных основ и внедрение новых методов оптимизации реагентного режима в практику флотационного обогащения руд цветных металлов на базе средств ионметрии : автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Ленинград, 1989. — 48 с.
15. Романенко С. А. Эффективность применения мультисенсорных систем ионметрии и методов нейросетевого моделирования процесса флотации в лабораторных исследованиях // Обогащение руд. 2013. № 1. С. 18–22.
16. Мелентьев Б. Н., Иваненко В. В., Памфилова Л. А. Растворимость некоторых рудообразующих сульфидов в гидротермальных условиях. — М. : Наука, 1968. — 102 с.
17. Nooshabadi A. J., Rao K. H. A new insight into oxidation mechanisms of sulphide minerals // XXVII International Mineral Processing Congress. 2014. Chapter 2. С. 106–115. 

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 11, pp. 65–70  
DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.12

**Using potentiograms in assessment of process properties of copper ore in terms of Zhezkazgan deposit**

**Information about authors**

**K. M. Arustamyan**<sup>1</sup>, Head of laboratory  
**S. A. Romanenko**<sup>1</sup>, Leading Production Design Engineer, S\_Romanenko@rivs.ru  
**A. M. Arustamyan**<sup>2</sup>, Chief Project Engineer

<sup>1</sup> RIVS Research and Production, Saint-Petersburg, Russia  
<sup>2</sup> GiproRIVS, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract**

The article addresses ore dressability research issues. It is emphasized that the traditional approach uses the analogy method, which is basically a search for flotation regimes using the a priori information and proven practices. At the same time, the unicity of any ore deposit always brings considerable uncertainty in the ore processing result even with the exhaustive a priori information available. For this reason, the basic tool to assess ore dressability is eventually an experiment.

The flotation process performance, apart from material characteristics of ore, namely, mineral, chemical and grain-size compositions as well as texture and structure, is influenced by electrochemical properties of ore minerals. In the meanwhile, the current practice of ore dressability research neglects the electrochemical properties of flotation pulp.

In terms of Zhezkazgan copper ore, Kazakhstan, the article shows that potentiogram recording assisted by various electrode systems enables quantitative evaluation of electrochemical parameters of flotation pulp and identification of negative impacts exerted on ore dressing process. Such negative impacts are generation of ferric hydroxide compounds, copper cations, sulfide anions and complexing of ions of sulphydryl collector in the pulp. Assessment of the research findings using electrochemical methods shows optimal areas of analysis to reach the best production data of ore beneficiation.

**Keywords:** flotation, potentiogram, electrochemical parameters of pulp, complexing, copper ores, oxidized copper ores.

**References**

1. Kozin V. Z. Researching the ore concentrability: tutorial. Ekaterinburg: Publishing House of Ural State Mining University, 2008. 312 p.
2. Titov D. V. Usage of geophysical methods for evaluation of technological characteristics of pyrite-polymetallic deposit ores. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2006. Iss. 4, Vol. 309. pp. 40–47.
3. Titov D. V. *Development of a complex of geophysical methods for evaluation of technological characteristics of ores (on the example of pyrite-polymetallic deposits in Ore Altai) : Dissertation ...*

*of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Tomsk, 2006. 119 p.*

4. Glembockiy V. A., Dmitrieva G. M. The influence of the genesis of minerals on their flotation characteristics. Moscow : Nauka, 1965. 110 p.
5. Xumeng Chen, Yongjun Peng, Dee Bradshaw. Effect of regrinding conditions on the flotation of sulphide minerals in the cleaner stage. *International Mineral Processing Congress*. 2014. Chapter 2. pp. 11–22.
6. Plackowski C., Nguyen A. V., Bruckard W. J. Surface species, roughness and hydrophobicity of enargite under electrochemically-controlled oxidation. *International Mineral Processing Congress*. 2014. Chapter 2. pp. 96–105.
7. Alireza Javadi Nooshabadi, Kota Hanumantha Rao. A new insight into oxidation mechanisms of sulphide minerals. *International Mineral Processing Congress*. 2014. Chapter 2. pp. 106–115.
8. Laskowski J., Castro S. Flotation in highly concentrated electrolyte solution. *International Mineral Processing Congress*. 2014. Chapter 3. pp. 1–12.
9. Etelapaa M., Petrov A. V., Romanenko S. A. et al. New approach to regulating the flotation process of selecting sulfide minerals from pyrite in a lime environment. *International Mineral Processing Congress*. 2012. Book 2. 680 p.
10. Bocharova V. A., Ignatkina V. A. On question of researching the influence of genetic characteristics of pyrite varieties and its structural associations to contrast and technological characteristics. *Tsvetnye Metally*. 2014. No. 8. pp. 20–27.
11. Mashevskiy G. N., Romanenko S. A. The experience of the Outotec company in development of flotation technology of non-ferrous metal ores. *Obogashchenie Rud*. 2014. No. 3. pp. 20–27.
12. Dmitriev I. N., Pruglo G. F., Fedorova O. V., Komissarenkov A. Physicochemical methods of analysis. Part I. Electrochemical methods of analysis: tutorial for extramural students. Saint Petersburg, 2014. 78 p.
13. Mashevskiy G. N., Kokorin A. M. Development of scientific basics of perfecting the technologies and creation of an algorithmic base for computer-assisted regulation of flotation of ores at “Erdenetiyn Ovoo” deposit with the goal of increasing the profitability of production. *New solutions in technics, technology of extraction and processing of ore on the Erdenet enterprise : collection of reports of scientific-technical council of Erdenet enterprise, June 18–19, 1998*. pp. 87–101.
14. Mashevskiy G.N. *Development of scientific basics and practical implementation of new methods for optimization of reagent regimes to flotation-based enrichment of non-ferrous metal ores through ionometry : thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Leningrad, 1989. 48 p.*
15. Romanenko S. A. The effectiveness of application of multisensory ionometric systems and methods of neural-network modelling of flotation process in laboratory research. *Obogashchenie Rud*. 2013. No. 1. pp. 18–22.
16. Melentev B. N., Ivanenko V. V., Pamfilova L. A. Solubility of certain ore-forming sulphides in hydrothermal conditions. Moscow : Nauka, 1968. 102 p.
17. Nooshabadi A. J., Rao K. H. A new insight into oxidation mechanisms of sulphide minerals. *XXVII International Mineral Processing Congress*. Chapter 2. pp. 106–115.