

## О РЕГУЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТРАСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУЛЬФИДОВ

**В.А. Бочаров**<sup>1</sup>, В.А. Игнаткина<sup>1</sup>, Д.В. Абрютин<sup>2</sup>, А.А. Каюмов<sup>1</sup>, В.Р. Каюмова (Корж)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: maliaby\_92@mail.ru

<sup>2</sup> ООО «АДВ-Инжиниринг», Москва, Россия

**Аннотация:** Представлены результаты изучения закономерностей формирования контрастных электрохимических свойств сульфидов в условиях развития окислительно-восстановительных процессов в цикле измельчения при наличии микрогальванопары пирит-железо измельчающей среды с контролем и регулированием электродных процессов. Изучены окисление и кинетика поглощения кислорода пиритом при измельчении, представлена зависимость концентрации серосодержащих анионов при окислении пирита в диапазоне pH 6–14. Установлено, что наибольшее поглощение кислорода пиритом происходит в высокощелочной среде (pH 12). С повышением щелочности среды концентрация серосодержащих анионов возрастает в разы, особенно тиосульфат-ионов ( $S_2O_3^{2-}$ ), где наблюдается снижение флотоактивности пирита. Выполнены экспериментальные измерения электродных потенциалов пиритного и стального электродов, которые позволили выявить взаимосвязь между условиями обработки, значениями электродных потенциалов и флотоактивностью сульфидов, кварца. Установлено, что величины потенциалов зависят от pH и концентрации модификаторов. Наибольшая разница потенциалов установлена при pH 11 и составляет 600 мВ в сравнении с pH 7 и 9, что предопределяет условия подавления пирита и его влияния на процесс селективной флотации. Изучено влияние порошкового металлического железа измельчающей среды на флотоактивность сульфидных минералов ( $FeS_2$ ,  $CuFeS_2$ ,  $ZnS$ ) и  $SiO_2$  в присутствии разных модификаторов при pH 7 и 11. При продолжительном измельчении (> 60 мин) протекает интенсивное окисление сульфидных минералов и железа мелющей среды (>2 кг/т), что приводит к активации флотации пирита и снижению качества концентратов. С увеличением концентрации сернистого натрия растет значение потенциала пиритного электрода в отрицательной области при значениях pH  $\geq 9$ –11, что сопровождается снижением извлечения пирита.

**Ключевые слова:** железо, пирит, пирротин, электрохимия, электрод, потенциал, окисление, контрастность, флотация

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-05-00157.

**Для цитирования:** Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Абрютин Д. В., Каюмов А. А., Каюмова В. Р. (Корж) О регулировании электродных процессов для формирования контрастных технологических свойств сульфидов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10. – С. 39–50. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_10\_0\_39.

---

## Adjustment of electrode processes to build up contrast processing characteristics of sulfides

V.A. Bocharov<sup>1</sup>, V.A. Ignatkina<sup>1</sup>, D.V. Abrytin<sup>2</sup>, A.A. Kayumov<sup>1</sup>, V.R. Kayumova (Korzh)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,  
e-mail: maliaby\_92@mail.ru

<sup>2</sup> OOO «ADV-Inzhiniring», Moscow, Russia

---

**Abstract:** The article describes the studies into generation of contrast electrochemical characteristics of sulfides during oxidation–reduction processes in milling cycle with the pyrite–iron micro galvanic coupling and with monitoring and adjustment of electrode processes. The oxidation and oxygen absorption kinetics of pyrite in milling is studied, and the concentration of sulfur-containing anions in oxidation of pyrite in the pH range of 6–14 is presented. It is found that the highest absorption of oxygen by pyrite takes place in the high-alkali environment (pH 12). With the increasing alkalinity of the medium, the concentration of sulfur-containing anions grows by a few factors, and this is true particularly for thiosulfate ions ( $S_2O_3^{2-}$ ) where floatability of pyrite decreases. The experimental measurements of electrode potentials of pyrite and steel electrodes reveal correlation between the processing conditions, values of electrode potentials and floatability of sulfides and quartz. The values of the potentials depend on the pH and on the concentration of modifiers. The largest difference between the potentials happens at pH 11 and is 600 mV as against the values of the potentials at pH 7 and 9, which governs pyrite suppression and affects selective flotation. The influence of the metallic iron powder as the milling environment on the floatability of sulfide minerals ( $FeS_2$ ,  $CuFeS_2$ ,  $ZnS$ ) and  $SiO_2$  in the presence of different modifiers at pH 7 and 11. The long-time milling (> 60 min) induces intense oxidation of sulfide minerals and milling iron (>2 kg/t), which activates flotation of pyrite and reduces quality of concentrates. With the increasing concentrate of sodium sulfate, the pyrite electrode potential grows in the negative range at  $pH \geq 9-11$ , which goes with the reduction in pyrite extraction.

**Key words:** iron, pyrite, pyrrhotine, electrochemistry, electrode, potential, oxidation, contrast, flotation.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 20-05-00157.

**For citation:** Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Abrytin D. V., Kayumov A. A., Kayumova V. R. (Korzh). Adjustment of electrode processes to build up contrast processing characteristics of sulfides. *MLAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(10):39-50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_10\_0\_39.

---

### Введение

Основные технологические показатели флотации сульфидов определяются физико-химическими свойствами минералов, ионно-молекулярным составом и щелочностью среды, что дает возможность направленного регулирования сорбционных, а следовательно, и флотацион-

ных свойств разделяемых сульфидных минералов. Контрастность поверхностных свойств минералов, обладающих близкими флотационными свойствами, может быть повышена посредством энергетических воздействий (электрохимические способы, обработка ультразвуком, ускоренными электронами и др.),

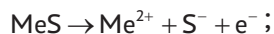
путем разработки и использования селективных реагентов-собирателей [1–3].

Пирит, пирротин и другие сульфиды железа в своем составе содержат атомы железа и серы, но имеют различные кристаллохимическую и кристаллографическую структуры. Являются основными рудообразующими минералами колчеданных медных, медно-цинковых и полиметаллических руд. Труднообогатимые сульфидные руды активно окисляются в процессе измельчения; находящиеся в растворе катионы меди значительно активируют сфалерит, пирит и пирротин, ухудшая селекцию сульфидов, что осложняет получение качественных товарных концентратов цветных металлов при требуемом технологическом извлечении. В связи с этим появляется необходимость в определении условий направленного регулирования поверхностных свойств сульфидов на стадии раскрытия минеральных ассоциаций с последующим разделением минералов (разновидностей) флотацией на основе регулирования параметров окислительно-восстановительных реакций при взаимодействии микрогальванопары «пирит ( $\text{FeS}_2$ ) – металлическое железо ( $\text{Fe}^0$ ) измельчающей среды». Практика флотации подтверждает сохранение актуальности проблемы снижения флотоактивности разновидностей сульфидов железа, прежде всего пирита корродированного, коллоидного, эмульсионного, метаколлоидной структуры [4].

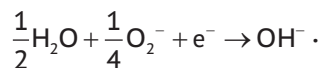
Контроль процесса окисления сульфидов посредством измерения pH, ОВП и концентраций регуляторов, модификаторов среды позволяет выявить факторы, которые определяют флотируемость или депрессию пирита и пирротина, что позволяет установить параметры предварительной подготовки рудного материала, при которых обеспечивается необходимый технологический результат.

Цель работы заключается в установлении роли железа в процессе окисления сульфидов, взаимодействия микрогальванопар  $\text{FeS}_2 - \text{Fe}^0$  при измельчении для повышения контрастности флотации труднообогатимых сульфидных руд. Электрохимическое состояние поверхности сульфидных минералов, как отмечают многие исследователи [5–10], определяется наличием переходных металлов в составе сульфидов, обеспечивающих протекание окислительно-восстановительных реакций. Присутствие изоморфных примесей, микродефектов влияет на сорбционную способность поверхности по отношению к флотационным реагентам и, как результат, – на смачиваемость поверхности. Электрохимический механизм растворения сульфида на границе с водой описывается уравнениями:

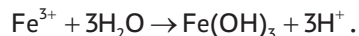
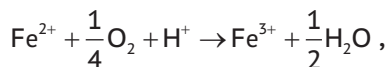
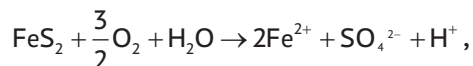
анод (окислительная реакция):



катод (восстановительная реакция):



Для поверхности пирита характерно протекание следующих окислительных процессов:



Сульфиды являются полупроводниками [10]. Полупроводник, имеющий избыток металла, обладает электронной проводимостью, а полупроводник, имеющий избыток металлоида (мышьяк, германий, теллур, сурьма), обладает дырочной проводимостью. Контактующие микрогальванопары на поверхности определяют интенсивность окисления

поверхности минеральных ассоциаций зерен.

По данным А.Ф. Таггарта, И. Уорка, И.А. Каковского [11, 12] тонкодисперсное металлическое железо играет важную роль в химических реакциях во флотации, в присутствии железа и его катиона (III) скорость окисления сульфидов существенно возрастает. Отмечается, что в процессе измельчения сульфидных руд в шаровых мельницах натирается более 1 кг/т металлического железа, которое окисляется в слабощелочных и слабощелочных средах с высокой скоростью. В работах И.А. Каковского, С.И. Митрофанова, М.Я. Рыскина, В.А. Чантурия и др. [13–16] приводятся электрохимический механизм окисления пирита и пирротина, их электродные потенциалы. Показано, что степень окисления сростков сульфидов железа возрастает в результате взаимодействия микрогальванопар, что подтверждено увеличением в жидкой фазе сульфоксидных анионов, а на поверхности сульфидов зафиксировано наличие гидроксидного железа и элементной серы. Изменения величины потенциалов пиритного электрода зависят от концентрации и типа потенциалопределяющих ионов, что определяется электролитами, к которым относятся неорганические серосодержащие модификаторы флотации. В работах зарубежных авторов [17–20] приводятся данные о повышении интенсивности окислительно-восстановительных процессов (ОВП) на поверхности сульфидов железа и сульфидных минералов цветных металлов в присутствии металлического железа, что приводит к нарушению селективности флотации, также показано, что разница в значениях потенциалов, контактирующих микрогальванопар, влияет на состав поверхностных соединений, изменяющих свойства и флотуемость минералов. Таким образом, понимание электрохи-

мических процессов, происходящих на минеральной поверхности при изменении потенциала и щелочности среды, позволяет установить условия повышения контрастных технологических свойств сульфидных минералов.

### **Объекты и методы исследования**

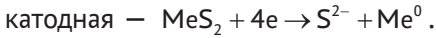
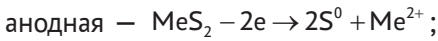
В качестве объектов исследований использованы мономинеральные фракции пирита ( $\text{FeS}_2$ ), халькопирита ( $\text{CuFeS}_2$ ), сфалерита ( $\text{ZnS}$ ) и кварца ( $\text{SiO}_2$ ).

Измерения электрохимических характеристик выполнены на автоматизированной установке с непрерывным контролем изменения электродных потенциалов для фиксирования кривых катодных поляризации контактирующих электродов (пиритного и стального). Отличительная особенность установки заключается в том, что рабочие пиритный и стальной электроды при необходимости могут соприкасаться, образуя замкнутую цепь, в качестве электрода сравнения выступает хлорсеребряный электрод ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ). Модификаторы — сернистый натрий, сульфосоли при pH 7, 9, 11 ( $\text{NaOH}$ ). В процессе изучения поглощения кислорода пульпой при измельчении концентрация кислорода в растворе на входе в мельницу была постоянной за счет регулирования парциального давления в объеме герметически закрытого реактора (мельница, кондиционер).

### **Обсуждение результатов**

Пирит и пирротин — основные рудообразующие минералы сульфидных руд цветных металлов. Сульфиды железа в процессах измельчения и флотации находятся в постоянном контакте с сульфидными минералами цветных металлов, образуя микрогальванопары, способствующие возрастанию скорости окисления сульфидов цветных металлов. При контакте сульфидов (гальва-

нопар) происходит «самополяризация», ускоряющая растворение «сульфида-анода». При этом поляризация способствует протеканию реакций:



Окисление сульфидных минералов при измельчении и в процессе флотации играет наиболее существенную роль в регулировании основных технологических показателей флотации.

Сульфидные минералы при взаимодействии с кислородом в зависимости от ионно-молекулярного состава образуют гидроксиды, сульфоксидные и карбонатные соединения. Промежуточными продуктами окисления при измельчении пирита могут быть ионы  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  в растворе и  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  на поверхности, количественный состав которых зависит от величин pH и Eh (ОВП).

Проведены исследования по изучению поглощения кислорода пиритом в процессе его измельчения, которые предопределяют изменения поверхностных свойств с образованием на поверхности сульфида пассивирующих пленок типа гидроксида железа.

На рис. 1 – 2 представлены результаты изучения кинетики поглощения кис-

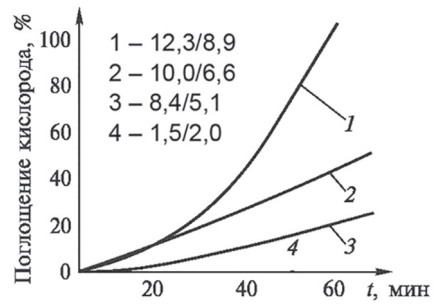


Рис. 1. Кинетика поглощения кислорода в процессе измельчения мономинеральной фракции пирита в зависимости от pH<sub>исх/ост</sub>

Fig. 1. Oxygen absorption kinetics during milling of monomineral pyrite fraction as function of pH<sub>init/resid</sub>

лорода (рис. 1) и окисления пирита (рис. 2) при измельчении и зависимость концентрации серосодержащих анионов при окислении пирита в диапазоне pH 6 – 14.

Как видно из рис. 1, максимум поглощения кислорода пиритом происходит в высокощелочной среде pH 12. Полученные зависимости поглощения кислорода пиритом согласуются с результатами исследований И.А. Каковского с сотрудниками [21] с использованием полярографического датчика. Наибольшая и устойчивая концентрация тиосульфат-ионов наблюдается при pH ≥ 12 (рис. 2), при котором флотоактивность пирита должна значительно снижаться,

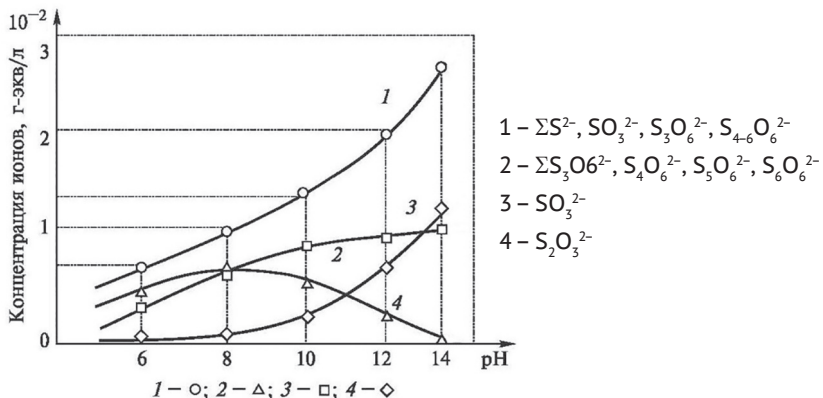
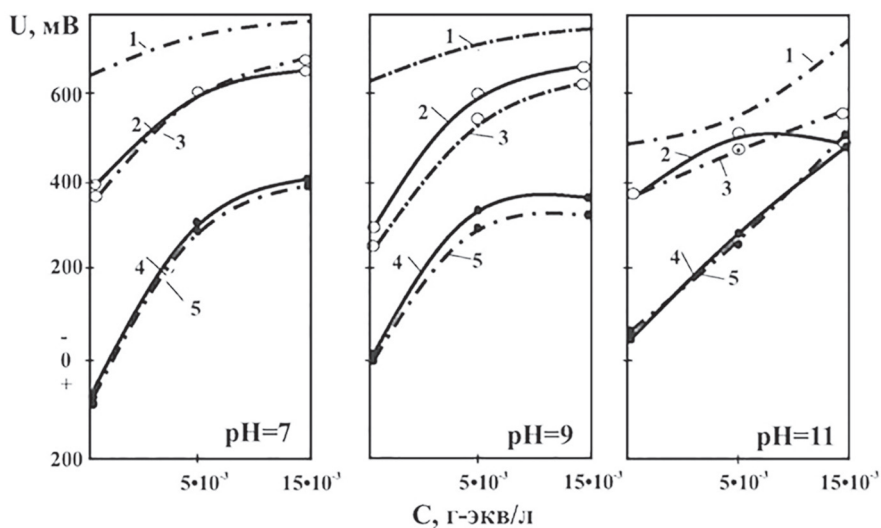


Рис. 2. Зависимость концентрации серосодержащих ионов при окислении пирита от величины pH среды

Fig. 2. Concentration of sulfur-bearing ions in oxidation of pyrite versus pH



- 1 – индивидуально стальной электрод  
 2 – пиритный электрод с контактом со стальным электродом с электрохимической поляризацией  
 3 – пиритный электрод с контактом со стальным электродом без электрохимической поляризации  
 4 – индивидуально пиритный электрод с электрохимической поляризацией  
 5 – индивидуально пиритный электрод без поляризации

Рис. 3. Влияние концентрации сернистого натрия на величину потенциала пиритного и стального электродов

Fig. 3. Influence of sodium sulfate concentration on potentials of pyrite and steel electrodes

и может наступать его глубокая депрессия. В высокощелочной среде возрастает роль гидроксид-ионов. Устойчивость тиосульфат-ионов зависит от интенсивности окисления других сульфоксидных ионов, которые, потребляя значительную часть кислорода из раствора, снижают его концентрацию и защищают тем самым тиосульфат-ионы от окисления. В щелочной среде окисление сульфидных минералов сопровождается понижением щелочности жидкой фазы с  $\text{pH}_{\text{исх}} 8,3$  до  $\text{pH}_{\text{ост.}} 5,1$ ; с  $12,3$  до  $7,3$ ; с  $1$  н.  $\text{NaOH}$  до  $0,65$  н.  $\text{NaOH}$  соответственно, что является следствием окисления пирита и железа измельчающей среды.

С целью изучения роли железа в процессе взаимодействия с сульфидными минералами проведены экспериментальные измерения электродных потенциалов пиритного и стального электродов. На рис. 3 приведена зависимость потен-

циала пиритного и стального электродов от концентрации модификатора.

Измерения потенциалов электрода в среде восстановителя сернистого натрия в диапазоне концентраций  $5 \cdot 10^{-3}$  –  $15 \cdot 10^{-3}$  г-экв/л при поддержании величины  $\text{pH}$  7, 9 и 11 проведены самостоятельно и в контакте со стальным электродом как с поляризацией, так и при ее отсутствии.

Концентрация модификатора и величина  $\text{pH}$  влияют на сдвиг электродного потенциала (рис. 3). Традиционно электродный потенциал пирита имеет значения  $220$  –  $240$  мВ в зависимости от примененного в измерениях электрода сравнения. С ростом величины  $\text{pH}$  в среде сернистого натрия электродный потенциал пиритного электрода сдвигается в отрицательную (восстановительную) область до минус  $200$  – минус  $400$  мВ (зависимости 4 и 5, рис. 3). При инди-



видуальном использовании пиритного электрода, наложении тока поляризации потенциал в среде восстановителя (зависимость 4) незначительно сдвигается в отрицательную область. Индивидуально стальной электрод в среде сернистого натрия находится в диапазоне минус 700 — минус 500 мВ; в высокощелочной среде электродный потенциал стального электрода понижается до минус 450 — минус 670 мВ. При контакте пиритного и стального электрода в среде сернистого натрия потенциал пиритного электрода (2 из 3) значительно сдвигается в восстановительную область (минус 400 — минус 600 мВ). Таким образом, при контакте со стальным электродом в восстановительных условиях «благородность» пирита снижается, вероятность окисления его поверхности повышается и, как следствие, флотоактивность пирита может возрасти. Измельчительная среда в виде стальных шаров снижает коррозионную стойкость пирита, при этом окисляются стальные шары. Вместе с тем пирит сохраняет роль катода в микрогальванопарах с сульфидами цветных металлов.

Исследования флотоактивности показали, что пирит хорошо флотируется ксантогенатами в слабокислых и нейтральных

средах в присутствии восстановителей — диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), сульфид- и гидросульфида натрия. При pH более 9–10 интенсивность окислительных процессов на поверхности сульфидов возрастает, при этом пирит достаточно устойчив по отношению к действию сульфид- и гидросульфид-ионам; с увеличением pH до 9–12 депрессия пирита усиливается, концентрация в жидкой фазе серосодержащих анионов  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SH}^-$  возрастает [3, 15, 22–25]. Пирит в присутствии катионов Fe (III) — сильного окислителя (продукта окисления железа измельчающей среды и самого минерала) поглощает значительно больше кислорода, вследствие чего концентрация серосодержащих ионов в пульпе на порядок выше. Другие минералы сульфидных массивных руд в исследованных условиях также окисляются с образованием серосодержащих ионов, концентрация которых зависит от их доли в руде.

На рис. 4 приведены результаты изучения влияния порошкового металлического железа измельчающей среды на флотоактивность смеси сульфидных минералов  $\text{FeS}_2$ ,  $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{ZnS}$  (доля пиритной серы составляет около 80% от общей серы в смеси) и  $\text{SiO}_2$  в присут-

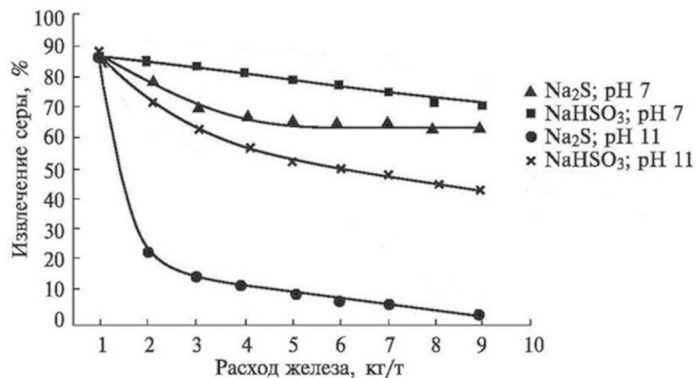


Рис. 4. Влияние металлического железа на извлечение сульфидной серы в присутствии модификаторов ( $C = 5 \cdot 10^{-4}$  г-экв/л)

Fig. 4. Effect of metallic iron on extraction of sulfide sulfur with modifiers ( $C = 5 \cdot 10^{-4}$  g-eqv/l)

ствии различных модификаторов в нейтральной (рН 7) и в сильнощелочной среде (рН 11, NaOH).

Флотоактивность сульфидных минералов при расходе железа более 2 кг/т существенно снижается. При рН 7 в присутствии сернистого натрия извлечение серы в пенный продукт от расхода железа изменяется незначительно, а при рН 11 наблюдается заметная депрессия сульфидных минералов. Извлечение серы снижается с сульфидом натрия при рН 11 до 10% и ниже, с гидросульфитом — до 40% в сравнении с опытами без присутствия металлического железа. Следует отметить, что флотуемость сульфидов меди в присутствии гидросульфита и сульфида натрия сохраняется достаточно высокой, депрессия значительно усиливается при рН 7, 9, 11 с увеличением расхода железа  $\geq 2$  кг/т. Извлечение цинка с гидросульфитом составляет менее 20%, а с сульфидом натрия — значительно выше (60–80%), и не зависит от расхода железа. Таким образом, полученные результаты исследований показали взаимосвязь флотационных и электрофизических свойств

пирита. С ростом потенциала пиритного электрода в отрицательной области при значениях рН  $\geq 9$ –11 с увеличением концентрации сернистого натрия извлечение пирита снижается.

### **Заключение**

Выполненные экспериментальные исследования показали возможность регулирования контрастности технологических свойств сульфидных минералов на стадии их раскрытия (измельчения) посредством контроля щелочности среды, ОВП и концентрации кислорода воздуха, влияющих на окисление сульфидов цветных металлов и железа, в том числе железа мелющей среды ( $>2$  кг/т). Продолжительное измельчение ( $>60$  мин) приводит к снижению качества концентратов за счет повышения флотоактивности пирита. В процессе измельчения сульфидных руд цветных металлов измерение и регулирование щелочности среды (рН 11), ОВП ( $-400$ ÷ $-600$  мВ) позволит предварительно подготовить и выводить раскрытые (свободные) частицы и сростки сульфидных минералов, своевременно направляемых на флотацию.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Leja J.* Electrical characteristics of interfaces. Electrical double layer and zeta potential / Surface Chemistry of Froth Flotation. Plenum Press, New York, 1982, pp. 433–492. DOI: 10.1007/978-1-4615-7975-5\_7.
2. *Игнаткина В. А., Бочаров В. А., Аксенова Д. Д., Каюмов А. А.* Электрокинетический потенциал поверхности ультратонких сульфидов и флотоактивность минералов // Известия вузов. Цветная металлургия. — 2017. — № 1. — С. 4–11. DOI: 10.17073/0021-3438-2017-1-4-12.
3. *Сорокин М. М.* Флотация. Модификаторы. Физические основы. Практика. — М.: МИСиС, 2016. — 372 с.
4. *Moslemi H., Gharabaghi M.* A review on electrochemical behavior of pyrite in the froth flotation process // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2017, vol. 47, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.jiec.2016.12.012.
5. *Pozzo R. L., Iwasaki I.* Pyrite-pyrrhotite grinding media interactions and their effects on media wear and flotation // Journal of The Electrochemical Society. 1989, vol. 136, no. 6, pp. 1734–1740. DOI: 10.1149/1.2097001.
6. *Zhao Cao, Peng Wang, Wen-Bo Zhang, Xiao-Bo Zeng, Yong-Dan Cao* Mechanism of sodium sulfide on flotation of cyanide-depressed pyrite // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2020, vol. 30, no. 2, pp. 484–491. DOI: 10.1016/s1003-6326(20)65228-1.



7. Bao Guo, Yongjun Peng, Gretel Parker Electrochemical and spectroscopic studies of pyrite–cyanide interactions in relation to the depression of pyrite flotation // Minerals Engineering. 2016, vol. 92, pp. 78 – 85. DOI: 10.1016/J.MINENG.2016.03.003.
8. Ejtemaei M., Nguyen A. V. Characterisation of sphalerite and pyrite surfaces activated by copper sulphate // Minerals Engineering. 2017, vol. 100, pp. 223 – 232. DOI: 10.1016/J.MINENG.2016.11.005.
9. Nicol M. The electrochemistry of chalcopyrite in alkaline solutions // Hydrometallurgy. 2019, vol. 187, pp. 134 – 140. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.05.016.
10. Плаксин И. Н., Шафеев Р. Ш., Чантурия В. А. Взаимосвязь энергетического строения кристаллов минералов с их флотационными свойствами / Труды VIII Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых. Т. 2. – Л.: Механобр, 1969. – С. 235 – 245.
11. Hu Yue-Hua, Sun Wei Electrochemistry of flotation of sulfide minerals. Beijing: Tsinghua University Press, 2009, 306 p.
12. Dan Liu, Yi-Jie Wang, Yong-Jun Xian, Shu-Ming Wen Electronic structure and flotability of gold-bearing pyrite. A density functional theory study // Journal of Central South University. 2017, vol. 24, pp. 2288–2293. DOI: 10.1007/S11771-017-3640-4.
13. Каковский И. А. К вопросу о кинетике окисления смесей сульфидных минералов кислородом в водных растворах // Обогащение руд. – 1980. – № 3. – С. 3 – 6.
14. Митрофанов С. И., Рыскин М. Я. Электрохимические свойства минералов и адсорбция реагентов-собирателей / Труды VIII Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых. Т. 2. – Л.: Механобр, 1969. – С. 270 – 280.
15. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации. – М.: Руда и металлы, 2008. – 272 с.
16. Abramov A., Önal G., Dogan Z. Physico-chemical models for activation, flotation and depression of pyrite in copper flotation / Mineral Processing on the Verge of the 21st Century. 2017. DOI: 10.1201/9780203747117.
17. Nicol M., Suchun Zhang, Tjandrawan V. The electrochemistry of pyrite in chloride solutions // Hydrometallurgy. 2018, vol. 178, pp. 116 – 123. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.04.013.
18. Dongping Tao, Yue Wang, Lin Li An electrochemical study of surface oxidation and collectorless flotation of pyrite // International Journal of Electrochemical Science. 2018, vol. 13, pp. 5971 – 5982. DOI: 10.20964/2018.06.32.
19. Buswell A. M., Nicol M. J. Some aspects of the electrochemistry of the flotation of pyrrhotite // Journal of Applied Electrochemistry. 2002, vol. 32, pp. 1321–1329. DOI: 10.1023/A:1022664310845.
20. Alireza Javadi Sulphide minerals: surface oxidation and selectivity in complex sulphide ore flotation. Doctoral thesis. October 2015. Luleå University of Technology, Sweden. 48 p.
21. Каковский И. А., Косиков В. М. О количественной оценке кинетики окисления сульфидных минералов в растворе // Обогащение руд. – 1974. – № 1. – С. 28 – 31.
22. Yianatos J., Carrasco C., Vinnett L., Rojas I. Pyrite recovery mechanisms in rougher flotation circuits // Minerals Engineering. 2014, vol. 66–68, pp. 197–201. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.03.020.
23. Zhao Cao, Xumeng Chen, Yongjun Peng The role of sodium sulfide in the flotation of pyrite depressed in chalcopyrite flotation // Minerals Engineering. 2018, vol. 119, pp. 93–98. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.01.029.
24. Yasemin Öztürk, Özlem Bıçak, Elif Özdemir, Zafir Ekmekçi Mitigation negative effects of thiosulfate on flotation performance of a Cu-Pb-Zn sulfide ore // Minerals Engineering. 2018, vol. 122, pp. 142 – 147. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.034.
25. Yufan Mua, Yongjun Peng, Lauten R. A. The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems – A Literature review // Minerals Engineering. 2016, vol. 96–97, pp. 143 – 156. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.018. **PLAS**

## REFERENCES

1. Leja J. Electrical characteristics of interfaces. Electrical double layer and zeta potential. *Surface Chemistry of Froth Flotation*. Plenum Press, New York, 1982, pp. 433–492. DOI: 10.1007/978-1-4615-7975-5\_7.
2. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., Aksenova D. D., Kayumov A. A. Zeta potential of the surface of ultrafine sulfides and floatability of minerals. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2017, no. 1, pp. 4–11. [In Russ]. DOI: 10.17073/0021-3438-2017-1-4-12.
3. Sorokin M. M. *Flotatsiya. Modifikatory. Fizicheskie osnovy. Praktika* [Flotation. Modifiers. Physical basics. Practice], Moscow, MISiS, 2016. 372 p.
4. Moslemi H., Gharabaghi M. A review on electrochemical behavior of pyrite in the froth flotation process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2017, vol. 47, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.jiec.2016.12.012.
5. Pozzo R. L., Iwasaki I. Pyrite-pyrrhotite grinding media interactions and their effects on media wear and flotation. *Journal of The Electrochemical Society*. 1989, vol. 136, no. 6, pp. 1734–1740. DOI: 10.1149/1.2097001.
6. Zhao Cao, Peng Wang, Wen-Bo Zhang, Xiao-Bo Zeng, Yong-Dan Cao Mechanism of sodium sulfide on flotation of cyanide-depressed pyrite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020, vol. 30, no. 2, pp. 484–491. DOI: 10.1016/s1003-6326(20)65228-1.
7. Bao Guo, Yongjun Peng, Gretel Parker Electrochemical and spectroscopic studies of pyrite-cyanide interactions in relation to the depression of pyrite flotation. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 92, pp. 78–85. DOI: 10.1016/J.MINENG.2016.03.003.
8. Ejtemaei M., Nguyen A. V. Characterisation of sphalerite and pyrite surfaces activated by copper sulphate. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 100, pp. 223–232. DOI: 10.1016/J.MINENG.2016.11.005.
9. Nicol M. The electrochemistry of chalcopyrite in alkaline solutions. *Hydrometallurgy*. 2019, vol. 187, pp. 134–140. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.05.016.
10. Plaksin I. N., Shafeev R. Sh., Chanturiya V. A. The relationship of the energy structure of mineral crystals with their flotation properties. *Trudy VIII Mezhdunarodnogo kongressa po obogashcheniyu poleznykh iskopaemykh*. T. 2 [Proceedings of the VIII International Congress on Mineral Enrichment, vol. 2] Leningrad, Mekhanobr, 1969, pp. 235–245. [In Russ].
11. Hu Yue-Hua, Sun Wei *Electrochemistry of flotation of sulfide minerals*. Beijing: Tsinghua University Press, 2009, 306 p.
12. Dan Liu, Yi-Jie Wang, Yong-Jun Xian, Shu-Ming Wen Electronic structure and floatability of gold-bearing pyrite. A density functional theory study. *Journal of Central South University*. 2017, vol. 24, pp. 2288–2293. DOI: 10.1007/S11771-017-3640-4.
13. Kakovskiy I. A. On the kinetics of oxidation of mixtures of sulfide minerals by oxygen in aqueous solutions. *Obogashchenie Rud*. 1980, no. 3, pp. 3–6. [In Russ].
14. Mitrofanov S. I., Ryskin M. Ya. Electrochemical properties of minerals and adsorption of collecting reagents. *Trudy VIII Mezhdunarodnogo kongressa po obogashcheniyu poleznykh iskopaemykh*. T. 2 [Proceedings of the VIII International Congress on Mineral Enrichment, vol. 2], Leningrad, Mekhanobr, 1969, pp. 270–280. [In Russ].
15. Chanturiya V. A., Vigdergauz V. E. *Elektrokhimiya sul'fidov. Teoriya i praktika flotatsii* [Electrochemistry of sulfides. Theory and practice of flotation], Moscow, Ruda i metally, 2008, 272 p.
16. Abramov A., Önal G., Dogan Z. Physico-chemical models for activation, flotation and depression of pyrite in copper flotation. *Mineral Processing on the Verge of the 21st Century*. 2017. DOI: 10.1201/9780203747117.
17. Nicol M., Suchun Zhang, Tjandrawan V. The electrochemistry of pyrite in chloride solutions. *Hydrometallurgy*. 2018, vol. 178, pp. 116–123. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.04.013.
18. Dongping Tao, Yue Wang, Lin Li An electrochemical study of surface oxidation and collectorless flotation of pyrite. *International Journal of Electrochemical Science*. 2018, vol. 13, pp. 5971–5982. DOI: 10.20964/2018.06.32.

19. Buswell A. M., Nicol M. J. Some aspects of the electrochemistry of the flotation of pyrrhotite. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2002, vol. 32, pp. 1321–1329. DOI: 10.1023/A:1022664310845.

20. Alireza Javadi *Sulphide minerals: surface oxidation and selectivity in complex sulphide ore flotation*. Doctoral thesis. October 2015. Luleå University of Technology, Sweden. 48 p.

21. Kakovskiy I. A., Kosikov V. M. On the quantitative assessment of the kinetics of oxidation of sulfide minerals in solution. *Obogashchenie Rud*. 1974, no. 1, pp. 28 – 31. [In Russ].

22. Yianatos J., Carrasco C., Vinnett L., Rojas I. Pyrite recovery mechanisms in rougher flotation circuits. *Minerals Engineering*. 2014, vol. 66–68, pp. 197–201. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.03.020.

23. Zhao Cao, Xumeng Chen, Yongjun Peng The role of sodium sulfide in the flotation of pyrite depressed in chalcopyrite flotation. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 119, pp. 93–98. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.01.029.

24. Yasemin Öztürk, Özlem Bıçak, Elif Özdemir, Zafir Ekmekçi Mitigation negative effects of thiosulfate on flotation performance of a Cu-Pb-Zn sulfide ore. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 122, pp. 142 – 147. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.034.

25. Yufan Mua, Yongjun Peng, Lauten R. A. The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems – A Literature review. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 96 – 97, pp. 143 – 156. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.06.018.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бочаров Владимир Алексеевич<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: adminopr@misis.ru, ORCID ID: 0000-0002-8233-9635,

Игнаткина Владислава Анатольевна<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: woda@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2552-206X,

Абрютин Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, заместитель генерального директора, ООО «АДВ-Инжиниринг», e-mail: abrutin@mail.ru,

Каюмов Абдуазиз Абдурашидович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог, e-mail: maliaby\_92@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0502-6595,

Каюмова (Корж) Виктория Романовна<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: viktoriya.korzh09@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-7527-1284,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Каюмов А.А., e-mail: maliaby\_92@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Bocharov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: adminopr@misis.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8233-9635,

V. A. Ignatkina<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: woda@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2552-206X

D.V. Abrytin, Cand. Sci. (Eng.),

Deputy General Director, ООО «ADV-Inzhiniring»,

e-mail: abrutin@mail.ru,

A.A. Kayumov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Process Engineering,  
e-mail: maliaby\_92@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-0502-6595,  
V.R. Kayumova (Korzh)<sup>1</sup>, Graduate Student,  
e-mail: viktoriya.korzh09@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0001-7527-1284,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** A.A. Kayumov, e-mail: maliaby\_92@mail.ru.

Получена редакцией 20.07.2022; получена после рецензии 15.08.2022; принята к печати 10.09.2022.

Received by the editors 20.07.2022; received after the review 15.08.2022; accepted for printing 10.09.2022.



---

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

**НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД  
И ПЕРЕУКЛАДКИ ГИДРООТВАЛОВ**

(№ 1260/10-22 от 08.08.2022; 13 с.)

*Мироненко Илья Александрович* — аспирант, e-mail: ilya.mironenko.86@bk.ru,  
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева.

Доработка запасов угля на некоторых угольных карьерах Кузбасса требует переукладки пород, ранее намывных в гидроотвал, которые находятся над запасами угля. На основании анализа изменений физико-механических свойств намывных пород предлагается комплексная технология переукладки гидроотвалов, которая позволила обосновать новый способ их разработки и перемещения. Установлены зависимости, позволяющие определить параметры гидрокомплекса при совместной разработке пород гидроотвалов гидромонитором и землесосным снарядом, которые обеспечивают устойчивую работу комплекса, учитывают свойства пород и организационно-технические факторы. Оценка влияния горнотехнических условий на производительность гидрокомплекса показала, что в условиях гидроотвала № 2 разреза ОАО «Черниговец» производительность по породе при совместной разработке пород гидромонитором и земснарядом по сравнению с традиционной земснарядной увеличивается в 1,8 раза.

Ключевые слова: технология разработки пород гидроотвала гидромонитором и землесосным снарядом, оценка влияния горнотехнических условий на производительность гидрокомплекса.

**NEW OPPORTUNITIES FOR DEVELOPMENT OF QUATERNARY OVERBURDEN ROCKS  
AND RE-LAYING OF HYDRAULIC DUMPS**

*I.A. Mironenko*, Graduate Student, e-mail: ilya.mironenko.86@bk.ru,  
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russia.

Refinement of coal reserves in some coal mines in Kuzbass requires re-laying of rocks previously dumped in the hydraulic mine dump, which are located above coal reserves. Based on the analysis of changes in the physical and mechanical properties of alluvial rock, a complex technology of re-laying hydraulic waste dumps is proposed, which allowed us to substantiate a new way of developing and moving them. Dependencies have been established that allow determining the parameters of the hydrocomplex when jointly developing the rocks of hydro dumps with a hydraulic jet and a ground-pine shell, which ensure the stable operation of the complex, take into account the properties of the rocks and organizational and technical factors. An assessment of the influence of mining technical conditions on the performance of the hydrocomplex showed that in the conditions of the hydraulic dump No. 2 of the section of JSC «Chernihiv», the productivity of the rock during the joint development of rocks by a hydraulic monitor and a dredger increases by 1.8 times compared to the traditional dredger.

Key words: technology of hydropulver rock development using a jetting machine and a suction dredger, an assessment of influence of mining conditions on the performance of hydrocomplex.