

И. М. ОСКЕМБЕКОВ<sup>1</sup>, Н. С. БЕКТУРГАНОВ<sup>2</sup>, Г. Л. КАТКЕЕВА<sup>1\*</sup>,  
Г. БУРКИТСЕТЕРКЫЗЫ<sup>1</sup>, Д. Р. ГИЗАТУЛЛИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Химико-металлургический институт имени Абишева, Караганда, Казахстан,  
\*katkeeva@mail.ru

<sup>2</sup> Казахская Национальная Академия естественных наук, Астана, Казахстан

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФИДИРОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД<sup>1</sup>

**Резюме:** В работе представлены результаты исследований по флотационному обогащению окисленной медной руды Жезказганского региона состава, мас. %:  $Cu_{\text{общ}}$  – 1,4;  $Cu_{\text{ок}}$  – 1,2;  $SiO_2$  – 79,64;  $Al_2O_3$  – 6,0;  $CaO$  – 0,88;  $Fe$  – 1,6;  $MgO$  – 0,66;  $S_{\text{общ}}$  – 0,16, включающему предварительную сульфидизацию реагентом, полученным на основе механоактивированной серы и последующую флотацию. Методом планирования эксперимента исследованы процессы механоактивации элементарной серы и определены оптимальные условия измельчения. Получен реагент – сульфидизатор с заданными свойствами по сульфид-иону. Сульфидирующие свойства полученного реагента исследованы на окисленной медной руде и определены условия сульфидизации: температура процесса 90 °С, продолжительность сульфидирования 10 мин, расход сульфидизатора 100 % от стехиометрически необходимого для перевода всей окисленной меди в сульфидную. Исследовано влияние предварительной сульфидизации данным реагентом на флотацию окисленной медной руды. Эксперименты проведены при оптимальных условиях флотации: степень сульфидирования руды 40 %; расход ксантогената 400 г/т, вспенивателя 100 г/т руды. Также для сравнения проведены эксперименты по флотации без сульфидизации руды. Установлено, что предварительное сульфидирование руды реагентом на основе механоактивированной серы положительно сказывается на результатах флотации – качество концентрата повышается на 0,74 %, извлечение меди в концентрат увеличивается на 30 %. Получены математические модели процессов механоактивации элементарной серы, сульфидирования и флотации окисленной медной руды.

**Ключевые слова:** окисленная медная руда, сера, механоактивация, полисульфиды, сульфидизация, флотация, концентрат, обогащение

**Введение.** Горно-металлургическая отрасль – один из конкурентноспособных и динамично развивающихся секторов промышленности Казахстана. Сложный состав минерального сырья обуславливает необходимость создания новых эффективных технологий его комплексной и глубокой переработки. Эффективность процессов обогащения полезных ископаемых во многом предопределяет экономику всего горно-металлургического производства [1-3]. Проблема повышения эффективности обогащения окисленных медных руд остро стоит в медной отрасли промышленности Казахстана, где в общем объеме добываемого медного минерального сырья на долю окисленных руд приходится порядка 20 %. Проблема обусловлена природной гидрофильностью окисленных медных минералов, которая не позволяет применять флотационные методы обогащения, являющиеся традиционными при переработке сульфидного сырья.

Решение проблемы переработки данных руд флотационным методом видится в изменении

свойств окисленных минералов в сторону гидрофобизации поверхности. Исследователи активно занимаются разработкой новых приемов и схем обогащения, синтезом высокоэффективных флотореагентов [4-7].

Одним из методов решения проблемы является химическая модификация минералов посредством сульфидизации, в результате которой окисленные минералы превращаются в сульфидные с гидрофобной поверхностью. Для осуществления такого превращения могут быть использованы различные реагенты-сульфидизаторы. В их числе сульфид натрия. Эффективность действия сульфида натрия определяется так же выделением на поверхности сульфидируемого минерала элементарной серы в результате окисления сульфидизатора. При этом элементарная сера играет роль дополнительного гидрофобизатора поверхности.

Гидрофобизирующие свойства преобладают у полисульфида натрия. Его применение в качестве реагента-сульфидизатора позволяет повысить флотационную активность минералов за счет

<sup>1</sup> В проведении экспериментов принимали участие сотрудники Химико-металлургического института им. Ж. Абишева: в.н.с., к.т.н. Оскембекова Ж.С., инженер I кат. Шайке Ж.А., техник высш. кат. Жунусов Е.М., техник высш. кат. Жунусов А.М.

увеличения количества серы на минеральной поверхности. Полисульфид натрия можно получить растворением элементарной серы в сульфиде натрия, используя для этого серосодержащие отходы, решая при этом проблему утилизации данных отходов.

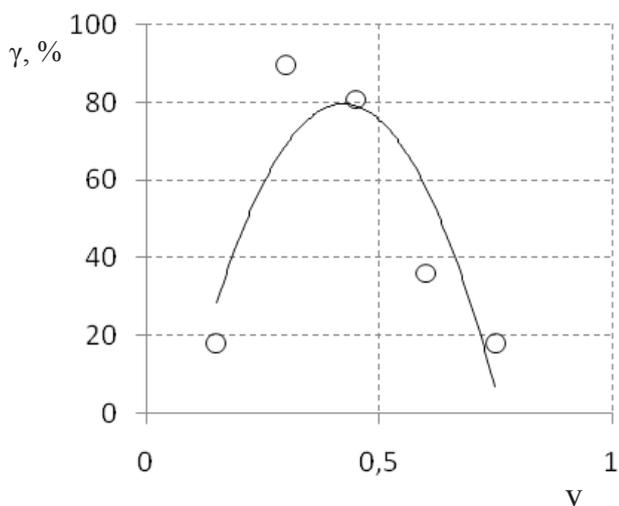
**Экспериментальная часть и обсуждение результатов.** Синтез полисульфидов, как правило, протекает в температурном интервале 80-90 °С. Кроме того некоторая часть исходной серы расходуется на образование побочных продуктов - тиосульфатов. Повысить эффективность синтеза сульфидирующего полисульфидного реагента можно за счет механоактивации элементарной серы посредством тонкого измельчения [8-10]. Применение такой активной серы позволяет ускорить синтез сульфидизатора и проводить его в более мягких условиях. Для обоснования эффективности получения реагента на основе механоактивированной серы и его использования при обогащении окисленных медных руд были проведены лабораторные исследования.

При синтезе полисульфидного реагента большое значение имеет активность, приобретаемая элементарной серой в процессе измельчения, которая, в свою очередь, зависит от условий измельчения.

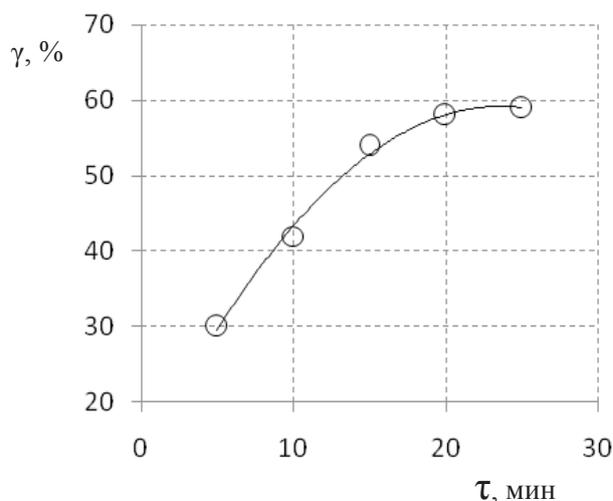
Для определения оптимальных условий механоактивации элементарной серы проведены исследования процесса измельчения с применением вероятностно-детерминированного метода планирования эксперимента [11]. Для экспериментов использовали элементарную серу марки «х.ч.», крупностью 2 мм. Опыты проведены в вибрационной мельнице марки ММ-301.

Исследовано влияние на процесс измельчения серы трех факторов – степени заполнения объема мельницы измельчаемым веществом (данный фактор обозначен как  $V$ ), продолжительности измельчения ( $\tau$ ) и частоты вибрации стаканов мельницы ( $\nu$ ).

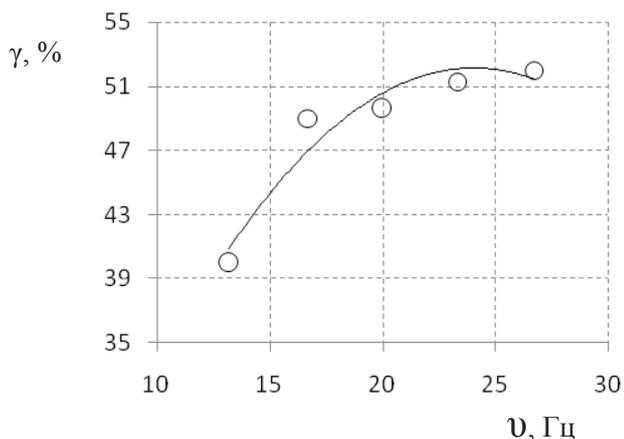
После измельчения серу растворяли в растворе сульфида натрия при постоянной температуре, продолжительности и скорости перемешивания. По истечении заданного времени фильтрованием отделя-



а



б



в

Рисунок 1 - Зависимости активности элементарной серы от факторов измельчения:  
 а) степень заполнения объема мельницы измельчаемым веществом;  
 б) продолжительность измельчения;  
 в) частота вибрации стаканов мельницы

ли раствор от не растворившейся серы. Определяли концентрацию растворенной серы спектрофотометрическим методом, основанным на линейной зависимости оптической плотности раствора при  $\lambda = 365$  нм от концентрации полисульфидной серы.

Функцией исследования выбрана активность измельченной серы ( $\gamma$ , %), о которой судили по количеству растворенной серы в водном полисульфидном растворе.

Провели выборку экспериментального массива по факторам, нашли средние значения функции по уровням и построили точечные графики частных зависимостей степени активности измельченной серы от исследуемых факторов (рисунок 1).

Уравнения частных зависимостей активности серы являются значимыми и имеют вид

$$\gamma_1 = -683,8v^2 + 579,5v - 43,04, \quad (1)$$

$$\gamma_2 = -0,085\tau^2 + 4,051\tau + 11,4, \quad (2)$$

$$\gamma_3 = -0,096v^2 + 4,635v - 3,55. \quad (3)$$

Обобщенное многофакторное уравнение для активности элементной серы, составленное на основе значимых частных зависимостей, имеет вид:

$$\gamma_p = 42,51 \cdot 10^{-5}(-683,8V^2 + 579,5V - 43,04) (-0,085\tau^2 + 4,051\tau + 11,4) \times (-0,096v^2 + 4,635v - 3,55). \quad (4)$$

Данное уравнение представляет собой математическую модель, которая адекватно описывает процесс механоактивации серы в вибромельнице.

Расчет по данному уравнению показал, что при степени заполнения стакана вибромельницы 0,3, продолжительности измельчения 20 мин и частоте вибрации стакана мельницы 18,3 Гц активность измельченной серы составляет 84,5 %.

Были проведены сравнительные эксперименты по растворению элементной серы крупностью частиц 2 мм и механоактивированной серы в водном растворе  $Na_2S$ . Результаты экспериментов показали, что при температуре 60 °С и продолжительности процесса растворения 30 мин активированная сера полностью переходит в раствор с образованием полисульфидного раствора. Для полного перехода в раствор крупнодисперсной серы необходимая температура составляет 85 – 90 °С за такой же промежуток времени.

На данный способ синтеза реагента с применением метода механоактивации получен инновационный патент [12].

Сульфидирующие свойства реагента на основе механоактивированной серы были исследова-

ны на окисленной медной руде Жезказганского региона состава, мас., %:  $Cu_{общ}$  – 1,4;  $Cu_{ок}$  – 1,2;  $SiO_2$  – 79,64;  $Al_2O_3$  – 6,0;  $CaO$  – 0,88;  $Fe$  – 1,6;  $MgO$  – 0,66;  $S_{общ}$  – 0,16. Основные медные минералы представлены малахитом, азуритом, теноритом. Измельченной до 85 % выхода класса крупности -0,071 мм с использованием полисульфида натрия, приготовленного на основе механоактивированной серы.

Исследования по сульфидизации руды проведены с привлечением вероятностно-детерминированного метода планирования эксперимента.

Исследовали влияние на процесс сульфидизации трех факторов – от температуры процесса ( $T$ , °С), времени процесса ( $\tau$ , мин), расхода сульфидирующего реагента ( $C$ , %).

Для каждого опыта готовили навеску измельченной руды и смешивали с водой до соотношения Ж:Т = 1:3 в термостатированном стеклянном сосуде при перемешивании. Пульпу нагревали до необходимой температуры. После достижения заданной температуры, в пульпу добавляли определенный объем раствора сульфидирующего реагента и вели процесс сульфидизации руды в течение заданного промежутка времени. По истечении времени просульфидированную пульпу фильтровали. Кек анализировали химическим методом на содержание общей и окисленной меди. На основе данных химического анализа определяли степень сульфидирования руды.

Далее строили точечные графики частных зависимостей сульфидирования руды от исследуемых факторов. Они приведены на рисунке 2.

По точечным данным подобрали аппроксимирующие функции для описания зависимости степени сульфидирования меди от исследуемых факторов:

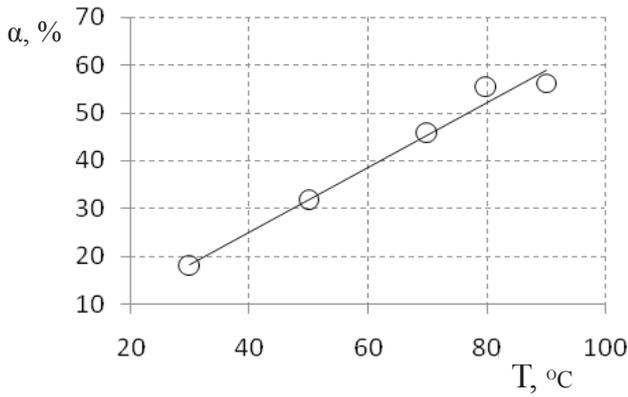
$$\alpha_1 = 0,675T - 1,93; \quad (5)$$

$$\alpha_2 = -0,224\tau + 49,58; \quad (6)$$

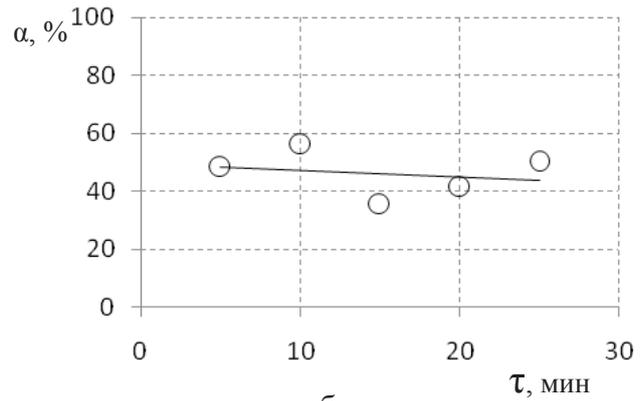
$$\alpha_3 = -0,0056C^2 + 1,34C - 29,84. \quad (7)$$

Анализ частных зависимостей показал, что в матричных экспериментах наибольшее влияние на степень сульфидирования меди оказывает расход реагента. Так, степень сульфидирования возрастает в среднем на 53 % при увеличении расхода реагента от 30 до 120 %. Причем увеличение степени сульфидирования происходит во всем исследуемом интервале.

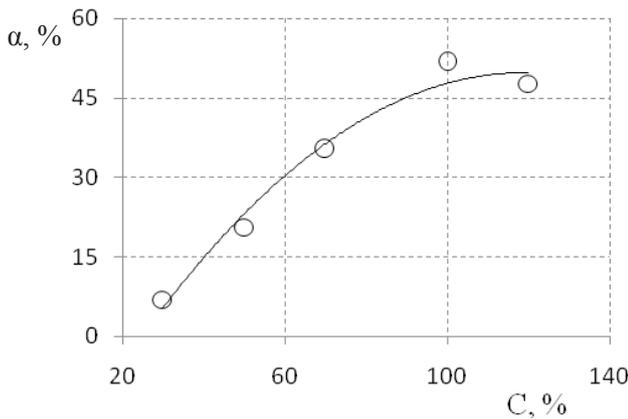
Аналогична зависимость степени сульфидирования от температуры процесса – в исследуемом интервале рост степени сульфидирования составляет в среднем 40 %.



а



б



в

Рисунок 2 – Зависимости степени сульфидирования окисленной медной руды от:  
а) температуры процесса;  
б) времени процесса;  
в) расхода сульфидирующего реагента

Влияние продолжительности процесса в рамках выбранного промежутка времени оказалось незначимым.

Обобщенное многофакторное уравнение для сульфидирования руды, составленное на основе значимых частных зависимостей, имеет вид:

$$\alpha = (0,0169T - 0,05)(-0,00014C^2 + 0,0335C - 0,75). \quad (8)$$

Данное уравнение представляет собой математическую модель, которая адекватно описывает процесс сульфидирования окисленной медной руды реагентом на основе механоактивированной серы.

Определены оптимальные условия сульфидирования: температура процесса 90° С, продолжительность сульфидирования 10 минут, расход сульфидизатора 100 % от стехиометрически необходимого для перевода всей окисленной меди в сульфидную.

С целью определения эффективности применения сульфидирующего реагента на основе механоактивированной серы в обогащении окисленных медных руд были проведены флотационные исследования.

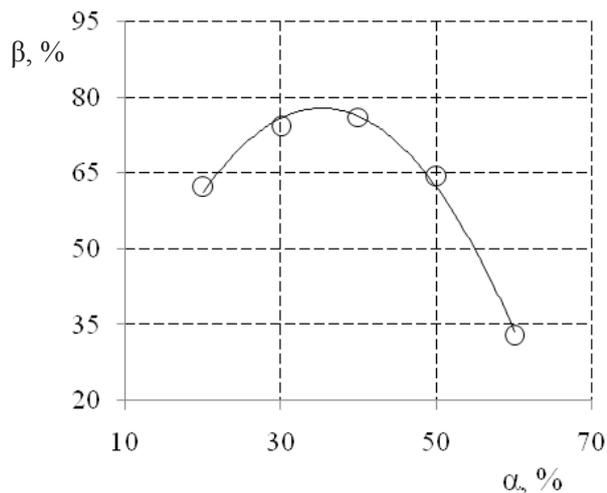
Опыты проведены на окисленной медной руде, измельченной до 85 % выхода класса крупности

частиц -0,071 мм, с использованием раствора полисульфида натрия, приготовленного на основе механоактивированной серы.

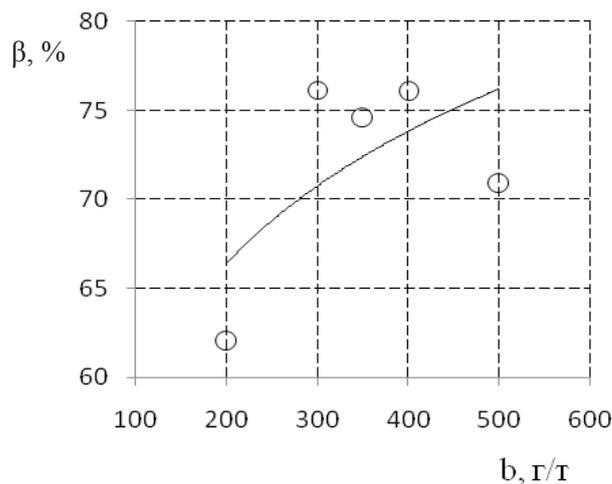
Исследовали влияние на извлечение меди во флотационный концентрат трех факторов – степени сульфидизации руды относительно окисленной меди (α), расхода собирателя бутилового ксантогената калия (b) и расхода вспенивателя Т-90 (d).

Для каждого опыта готовили навеску измельченной руды, которую смешивали с водой до отношения Т:Ж = 1:3. Сульфидизацию проводили в термостатированной емкости. Пульпу разогревали при перемешивании до необходимой температуры, добавляли определенное количество сульфидирующего реагента и вели процесс в течение заданного времени. По истечении времени пульпу охлаждали, добавляли воду до отношения Т:Ж = 1:4 и флотировали. Флотацию проводили во флотационной машине 237-ФЛ-А с объемом камеры 0,5 л. Продукты флотации анализировали химическим методом на содержание общей меди. На основе данных химического анализа определяли извлечение меди в продукты флотации (β).

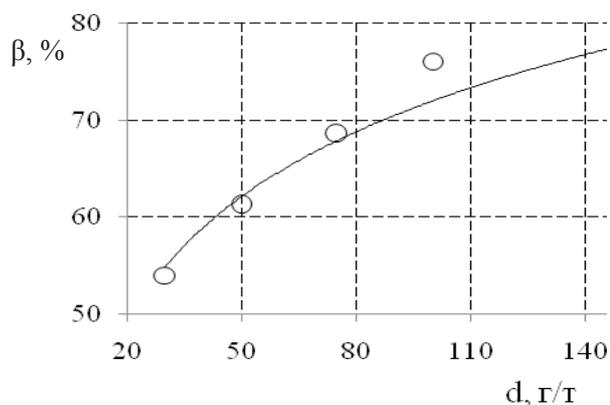
Полученные данные математически обрабатывали и построили точечные графики частных зависимостей флотации руды от исследуемых факто-



а



б



в

Рисунок 3 – Зависимости извлечения меди во флотационный концентрат от:  
 а) степени сульфидизации руды относительно окисленной меди;  
 б) расхода собирателя бутилового ксантогената калия;  
 в) расхода вспенивателя Т-90

ров. Они приведены на рисунке 3.

По точечным данным подобрали аппроксимирующие функции для описания зависимости извлечения меди в концентрат от исследуемых факторов:

$$\beta_1 = -0,072\alpha^2 + 5,071\alpha - 11,33; \quad (9)$$

$$\beta_2 = 10,73\ln b + 9,53; \quad (10)$$

$$\beta_3 = 14,23\ln d + 6,38. \quad (11)$$

Обобщенное многофакторное уравнение для флотации руды, составленное на основе значимых частных зависимостей, имеет вид:

$$\beta = 22,34 \cdot 10^{-5}(-0,072\alpha^2 + 5,071\alpha - 11,33) (10,73\ln b + 9,53) \times (14,23\ln d + 6,381). \quad (12)$$

Данное уравнение представляет собой математическую модель, которая адекватно описывает процесс флотации окисленной медной руды с предварительной сульфидизацией реагентом на основе механоактивированной серы.

На основании полученных данных проведены эксперименты при оптимальных условиях флотации: степень сульфидирования руды 40 %;

расходы ксантогената 400 г/т, вспенивателя 100 г/т руды. Также для сравнения проведены эксперименты по флотации без сульфидизации руды. Результаты представлены в таблице.

Таблица – Результаты прямой флотации и с сульфидированием окисленной медной руды

Условия опыта	Продукт	Вес, %	Содержание Си, %	Извлечение Си, %
Прямая флотация	К-т	6,70	4,48	23,44
	Пром.пр.	5,16	5,41	21,88
	Хвосты	88,14	0,79	54,68
		100,0		100,0
Флотация после сульфидирования	К-т	12,8	5,22	54,47
	Пром.пр.	7,14	3,73	21,95
	Хвосты	80,06	0,36	23,58
		100,0		100,0

Установлено, что предварительное сульфидирование руды реагентом на основе механоактивированной серы положительно сказывается на результатах флотации – качество концентрата повышается на 0,74 %, извлечение меди в концентрат увеличивается на 31,10 %.

**Выводы.** На основании результатов лабораторных испытаний была проведена предварительная оценка экономической эффективности переработки окисленной медной руды с использованием сульфидирующего реагента из механоактивированной серы. Показано, что применение нового способа переработки руды является рентабельным с показателем 12,4 % и годовым экономическим эффектом 495,2 тыс. дол.

Испытания на других окисленных рудах подтверждают эффективность использования данного реагента [13].

На способ обогащения окисленных медных руд с предварительной сульфидизацией реагентом на основе механоактивированной серы получено положительное решение на выдачу инновационного патента [14].

Таким образом, результаты проведенных исследований указывают на перспективность применения метода сульфидизации в обогащении окисленных медных руд и, в частности, на эффективность использования сульфидирующего реагента на основе механоактивированной серы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Шадрюнова И.В., Чекушина Т.В., Богданович А.В. Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья в рамках Евразийского экономического союза // Обогащение руд. – 2014. – № 6. – 48-50.
- 2 Чантурия В.А. Прогрессивные технологии комплексной и глубокой переработки природного и техногенного минерального сырья // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Плаксинские чтения – 2014: матер. междунар. совещ. – Алматы, Казахстан, 16-19 сентября 2014. – С. 5-6.
- 3 Жарменов А.А. Системное решение проблем в области геологоразведки, добычи и переработки минерального и техногенного сырья в целях устойчивого развития горно-металлургического комплекса // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Плаксинские чтения – 2014: матер. междунар. совещ. – Алматы, Казахстан, 16-19 сентября 2014. – С. 13-16.
- 4 Рябой В.И. Проблемы использования и разработки новых флотореагентов в России // Цветные металлы. – 2011. – № 3. – С.7-14.
- 5 Boulton A., Fornasiero D., Ralston J. Depression of iron sulphide flotation in zinc roughers // Minerals Engineering – 2001 – Vol. 14 – No 9 – P. 1067–1079.
- 6 Boulton A., Fornasiero D., Ralston J. Effect of iron content in sphalerite on flotation // Minerals Engineering – 2005 – Vol. 18 – P. 1120-1122.
- 7 Seke M.D., Pistorius P.C. Effect of cuprous cyanide, dry and wet milling on the selective flotation of galena and sphalerite // Minerals Engineering – 2006 – V. 19 – P. 1-11.
- 8 Авакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 350 с.

9 Масалимов И.А., Савинцев Ю.П. Получение и применение субмикронных частиц серы // Физикохимия ультрадисперсных систем // IV Всероссийская Междунар. конф.: Сб. научн. тр. – Москва, Россия, 2000 – 564 с.

10 Сергеев Г.Б. Нанохимия. – М.: МГУ, 2006 – 333 с.

11 Малышев В.П. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. – Алма-Ата: Наука, 1981. – 116 с.

12 Инноац. патент 27893 РК. Способ получения полисульфидов натрия / Оскембеков И.М., Бектурганов Н.С., Оскембекова Ж.С., Шарипова З.М., Акубаева М.А.; опубл. 25.12.2013, Бюл. № 1.

13 Шайке Ж.А., Каткеева Г.Л., Оскембеков И.М., Гизатуллина Д.Р., Акубаева М.А. Выбор оптимального режима сульфидизации окисленной медной руды // Промышленность Казахстана. – 2014 – № 4 – С. 68-71.

14 Положительное решение по заявке 2014/0518.1 от 14.04.2014 на инноац. патент РК. Способ обогащения окисленной медной руды / Оскембеков И.М., Каткеева Г.Л., Бектурганов Н.С., Оскембекова Ж.С., Шайке Ж.А.

#### REFERENCES

- 1 Shadrunova I.V., Chekushina T.V., Bogdanovich A.V. *Progressivnyye metody obogashcheniya i kompleksnoj pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya v ramkakh Evrazijskogo ehkonomicheskogo soyuza* (Progressive methods of enrichment and complex processing of natural and technogenic mineral raw materials within the framework of the Eurasian Economic Union) *Obogashchenie rud = Ore-dressing*. **2014**. 6. 48-50. (in Russ.)
- 2 Chanturiya V.A. *Progressivnyye tekhnologii kompleksnoj i glubokoj pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya* (Progressive technologies of comprehensive deep processing of natural and technogenic mineral raw materials). *Progressivnyye metody obogashcheniya i kompleksnaya pererabotka prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2014): mater. mezhdunar. Soveshch.* (Advanced enrichment methods and complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin readings – 2014: Proceedings of Internation. Meeting). Almaty, Kazakhstan, 16-19 September **2014**. 5-6. (in Russ.)
- 3 Zharmenov A.A. *Sistemnoe reshenie problem v oblasti geologorazvedki, dobychi i pererabotki mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya v tselyakh ustojchivogo razvitiya gorno-metallurgicheskogo kompleksa* (The system solution of problems in the field of geological exploration, production and processing of mineral and technogenic raw materials for sustainable development of mining and metallurgical complex) *Progressivnyye metody obogashcheniya i kompleksnaya pererabotka prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2014): mater. mezhdunar. Soveshch.* (Advanced enrichment methods and complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin readings – 2014: Proceedings of Internation. Meeting). Almaty, Kazakhstan, 16-19 September **2014**. 13-16. (in Russ.)
- 4 Ryaboy V.I. *Problemy ispol'zovaniya i razrabotki novykh floreagentov v Rossii* (Problems of use and development of new flotation reagents in Russia) *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*. **2011**. 3, 7-14 (in Russ.)
- 5 Boulton A., Fornasiero D., Ralston J. Depression of iron sulphide flotation in zinc roughers. *Minerals Engineering*. **2001**. 14. 9. 1067-1079. (in Eng.)
- 6 Boulton A., Fornasiero D., Ralston J. Effect of iron content in sphalerite on flotation. *Minerals Engineering*. **2005**. 18. 1120-1122. (in Eng.)

- 7 Seke M.D., Pistorius P.C. Effect of cuprous cyanide, dry and wet milling on the selective flotation of galena and sphalerite. *Minerals Engineering*. **2006**. 19. 1-11. (in Eng.)
- 8 Avakumov E.G. *Mekhanicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov* (Mechanical methods of activation of chemical processes). Novosibirsk: Nauka. **1986**. 350. (in Russ.)
- 9 Masalimov I.A., Savintsev Yu.P. *Poluchenie i primeneniye submikronnykh chastits sery* (The preparation and use of sub-micron particles of sulfur). *Fiziko-khimiya ul'tradispersnykh sistem* (Physical chemistry of ultrafine systems). IV Vserossijskaya Mezhdunar. Konf.: sb. nauchn. tr. (IV All-Russian International. Conf.: proceedings of sci. papers). Moscow, Russia. **2000**. 564. (in Russ.)
- 10 Sergeev G.B. *Nanokhimiya* (Nanotechnology). Moscow: MGU. **2006**, 333. (in Russ.)
- 11 Malyshev V.P. *Veroyatnostno-determinirovannoe planirovaniye ehksperimenta* (Probabilistic and deterministic planning of experiment). Alma-Ata: Nauka. **1981**, 116. (in Russ.)
- 12 Innov. Pat. 27893 KZ. *Sposob polucheniya polisul'fidov natriya* (A method for producing sodium polysulphides). Oskembekov I.M., Bekturganov N.S., Oskembekova Zh.S., Sharipova Z.M., Akubaeva M.A.; Opubl. 25.12.2013, 1. (in Russ.)
- 13 Shajke Zh.A., Katkeeva G.L., Oskembekov I.M., Gizatullina D.R., Akubaeva M.A. *Vybor optimal'nogo rezhima sul'fidatsii okislennoj mednoj rudy* (Selection of the optimal mode of sulphidation oxidized copper ore) *Promyshlennost' Kazahstana = Industry in Kazakhstan*. **2014**, 4. 68-71. (in Russ.)
- 14 Favourable decision on application 2014/0518.1 from 14.04.2014 for KZ Innov. Pat.. *Sposob obogashcheniya okislennoj mednoj rudy* (The process of enrichment of the oxidized copper ore). Oskembekov I.M., Katkeeva G.L., Bekturganov N.S., Oskembekova Zh.S., Shaikha Zh.A. (in Russ.)

### ТҮЙІНДЕМЕ

Жұмыста Жезқазған аймағының, құрамы, мас. %:  $Cu_{жалпы} - 1,4$ ;  $Cu_{т.т.} - 1,2$ ;  $SiO_2 - 79,64$ ;  $Al_2O_3 - 6,0$ ;  $CaO - 0,88$ ;  $Fe - 1,6$ ;  $MgO - 0,66$ ;  $S_{жалпы} - 0,16$  тотыққан мыс кенін механикалық белсендірілген күкірт негізінде алынған реагентпен алдын-ала сульфидтеу және келесі флотациялық байыту зерттеулерінің нәтижелері көрсетілген. Экспериментті жоспарлау әдісімен элементтік күкіртті механикалық белсендіру процесі зерттелді және оны ұнтақтаудың тиімді шарттары анықталды. Сульфид-ион бойынша берілген қасиеттерге ие сульфидтегіш реагент алынды. Алынған реагенттің сульфидтегіш қасиеттері тотыққан мыс кендерінде зерттелді және сульфидтеудің келесі шарттары анықталды: процестің температурасы  $90^{\circ}C$ , сульфидтеу ұзақтығы 10 минут, барлық тотыққан мысты сульфидтеуге қажет сульфидтегіштің стехиометриялық шығыны 100%. Тотыққан мыс кенінің флотациясына осы реагентпен алдын ала сульфидтеу әсері зерттелді. Эксперименттер флотацияның келесі тиімді шарттарында жүргізілді: кенді сульфидтеу дәрежесі 40%; ксантогенаттың шығыны 400 г/т, көпірткіштің шығыны 100 г/т. Сонымен қатар, салыстыру мақсатында сульфидтелмеген кенді флотациялау эксперименттері жүргізілді. Механикалық белсендірілген күкірт негізінде алынған реагентпен алдын ала сульфидтеу флотация нәтижесіне оңтайлы әсер ететіні анықталды – концентрат сапасы 0,74% -ға, мыстың концентратқа бөліну дәрежесі 30% -ға жоғарылайды. Элементтік күкіртті механикалық белсендіру, тотыққан мыс кенін сульфидтеу және флотациялау процестерінің математикалық үлгілері алынды.

**Түйінді сөздер:** тотыққан мыс кені, күкірт, механикалық белсендіру, полисульфидтер, сульфидтеу, флотация, концентрат.

### ABSTRACT

The paper presents results of research on the flotation enrichment of Zhezkazgan region's oxidized copper ores with composition as follows, mass %:  $Cu_{total} - 1.4$ ;  $Cu_{oxidized} - 1.2$ ;  $SiO_2 - 79.64$ ;  $Al_2O_3 - 6.0$ ;  $CaO - 0.88$ ;  $Fe - 1.6$ ;  $MgO - 0.66$ ;  $S_{total} - 0.16$ . The enrichment includes pre-sulphidation by reagent prepared on the basis of mechanically activated sulfur and subsequent flotation. Processes of mechanical activation of elemental sulfur were investigated and the optimal shredding conditions were determined by the method of experiment planning. The sulphidation reagent with desired properties of sulfide-ion was obtained. Sulphiding properties of the reagent were studied on the oxidized copper ores and identified sulphidation conditions: temperature of the process  $90^{\circ}C$ , sulphiding duration - 10 minutes, sulphidizer consumption - 100% of stoichiometrically required to transfer all oxidized copper into sulfide form. The influence of pre-sulphidation by the reagent on flotation of oxidized copper ore was investigated. Experiments were carried out under optimum conditions of flotation: the degree of ore sulphidation - 40%; consumption of xanthate - 400g/t, of foaming agent - 100 g/t of ore. Also experiments on flotation without sulphidation of ore were carried out for comparison. It was found that pre-sulphidation of ore by reagent on the basis of mechanical activated sulfur has a positive effect on the results of flotation – the quality of the concentrate increased on 0.74% and the recovery of copper into concentrate increases on 30%. Mathematical models of processes of elemental sulfur mechanical activation, sulphidation and flotation of oxidized copper ore were obtained.

**Keywords:** oxidized copper ore, sulfur, mechanical activation, polysulfide, sulphidation, flotation, concentrate, beneficiation

Поступила 26.12.2016.