



НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПИРИТНОГО КОНЦЕНТРАТА*

К.Е. Акопян¹, Г.Г. Карамян¹, А.Л. Акопян¹

¹Институт химической физики им. А.Б. Налбандяна НАН Армении
д. 5/2, ул. П. Севака, Ереван 0014, Армения
e-mail: chph@ichph.sci.am

doi: 10.15518/isjaee.2018.31-36.062-070

Заключение совета рецензентов: 24.08.18 Заключение совета экспертов: 19.09.18 Принято к публикации: 30.10.18

В работе обсуждались преимущества переработки концентратов пирита с помощью новой технологии, использующей обжиг в атмосфере водяного пара. Существуют различные технологии переработки пиритовых концентратов, содержащих драгоценные и цветные металлы, Au, Ag, Cu, а также другие элементы. Эти технологии часто имеют такие недостатки, как нежелательное выделение диоксида серы в окружающую среду, неполная экстракция полезных металлов.

Приведены оптимальные режимы проведения технологических процессов, таких как температура обжига, соотношение паровой и твердой фаз, длительность процесса, размеры частиц и др. Особое внимание уделялось десульфуризации пиритного концентрата с предотвращением выделения сернистого ангидрида в атмосферу и с переводом его в фазу твердой элементарной серы или сульфида натрия.

Разработанная технология позволяет получить железный огарок, и с последующей магнитной сепарацией и восстановлением в атмосфере водорода получить железо в виде губки – высококачественного продукта для выплавки сталей или чугунов.

Предлагаемая технология обеспечивает замкнутый цикл и безотходность с минимальным загрязнением окружающей среды. Технология испытана в пилотной лабораторной установке с использованием концентратов пирита Каджаранского месторождения Армении.

Ключевые слова: концентрат пирита; пароксидирование; десульфуризация; чистое железо.

NEW TECHNOLOGY OF COMPLEX PROCESSING OF PYRITE CONCENTRATE

K.E. Hakobyan¹, G.G. Karamyanyan¹, A.K. Hakobyan¹

¹Institute of Chemical Physics after A.B. Nalbandyan of NAS of Armenia
5/2 P. Sevak St., Yerevan, 0014, Armenia
e-mail: chph@ichph.sci.am

doi: 10.15518/isjaee.2018.31-36.062-070

Referred 24 August 2018 Received in revised form 19 September 2018 Accepted 30 October 2018

*Акопян К.Е., Карамян Г.Г., Акопян А.Л. Новая технология комплексной переработки пиритного концентрата // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;31-36:62-70.



The paper discusses the benefits of processing pyrite concentrates using a new technology that uses roasting in an atmosphere of water vapor. There are various technologies for the processing of pyrite concentrates containing precious and non-ferrous metals, Au, Ag, Cu and other elements. These technologies often have such disadvantages as undesirable release of sulfur dioxide into the environment, incomplete extraction of useful metals.

The optimal modes of technological processes, such as firing temperature, the ratio of steam and solid phases, the duration of the process, the size of the particles, etc. are given. Special attention was paid to the desulfurization of pyrite concentrate with the prevention of the release of sulfur dioxide into the atmosphere, and its transfer into the phase of solid elemental sulfur or sodium sulfide.

The developed technology makes it possible to obtain an iron cinder, and with subsequent magnetic separation and reduction in a hydrogen atmosphere to obtain iron in the form of a sponge—a high-quality product for smelting steel or cast iron.

The proposed technology provides a closed loop cycle and waste-free with minimal environmental pollution. The technology was tested in a pilot laboratory setup using concentrates from the Kajaran deposit in Armenia.

Keywords: pyrite concentrate; steam oxidation; desulfurization; pure iron.



Климент Енокович
Акопян
Kliment Nakobyan

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заведующий лабораторией обогащения и металлургии Института химической физики им. А.Б. Налбандяна НАН Армении.

Образование: Ереванский политехнический институт (1968 г.).

Область научных интересов: переработка и обогащение концентратов сульфидных горных пород; парометаллургические и электрохимические технологии извлечения металлов и других элементов.

Публикации: 70, включая патенты.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Chief of Laboratory of Enrichment and Metallurgy at Institute of Chemical Physics of NAS of Armenia.

Education: Yerevan Polytechnic Institute, 1968.

Research interests: processing and enrichment of sulfide ore concentrates; vapor-metallurgical and electrochemical technologies of extraction metals and other elements.

Publications: 70, including patents.



Гегик Гургенович
Карамян
Gagik Karameyan

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института химической физики им. А.Б. Налбандяна НАН Армении.

Образование: Ереванский государственный университет, физический факультет (1970 г.).

Область научных интересов: переработка концентратов горных пород; электрохимические источники тока; возобновляемая энергетика; экология.

Публикации: 90.
Research Gate: 14.

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher at Institute of Chemical Physics of Armenia.

Education: Yerevan State University, Physical Faculty, 1970.

Research interests: processing ore concentrates; electrochemical energy sources; renewable energy; ecology.

Publications: 90.



Армен Климентович
Акопян
Armen Nakobyan

Сведения об авторе: научный сотрудник лаборатории обогащения и металлургии Института химической физики им. А.Б. Налбандяна НАН Армении.

Образование: Ереванский политехнический институт (1992 г.).

Область научных интересов: переработка и обогащение концентратов сульфидных горных пород; парометаллургические и электрохимические технологии извлечения металлов и других элементов.

Публикации: 25, включая патенты.

Information about the author: Scientist of Laboratory of Enrichment and Metallurgy at Institute of Chemical Physics of NAS of Armenia.

Education: Yerevan Polytechnic Institute, 1992.

Research interests: processing and enrichment of sulfide ore concentrates; vapor-metallurgical and electrochemical technologies of extraction metals and other elements.

Publications: 25, including patents.



1. Введение

Концентраты пирита рассматриваются как сырье для производства железа и серной кислоты. Кроме того, эти концентраты содержат большое количество цветных металлов, следовательно, процесс переработки должен быть комплексным и эффективным. Наиболее распространенная технология переработки концентрата пирита, а также сульфидов других металлов – это высокотемпературный обжиг (до 1 500 °С). Однако такой способ имеет много недостатков: значительное содержание диоксида серы, а также вредных примесей (As, Se, Te, Hg) в выделяющихся газах, небольшая степень потребления продуваемого кислорода, формирование железа в виде гематита. В процессе высокотемпературного обжига пирита образуется шлак, который содержит малое количество железа и различных примесей. Существуют различные схемы обработки пирита, в том числе обработка в реакторе с псевдоожиженным слоем, хлоридная сублимация, продувка кислородом и т.д.

Мировое производство концентрата пирита в 2016 г. составляло 15,3 Мт, причем 96 % произвел Китай, который являлся и главным потребителем, в основном для производства серной кислоты. Другие страны-производители – Финляндия, Россия, Бразилия, КНДР и Турция, доля которых составляет ничтожную часть. Основным экспортером (75 % от мирового) пиритного концентрата является Финляндия (200 тысяч тонн), затем идут Россия (5 %), Италия (4 %) и Турция (2 %) [1]. В настоящее время стоимость концентрата пирита составляет 200 ÷ 500 долларов за тонну. Следует отметить, что стоимость концентрата может резко меняться в зависимости от содержания драгоценных металлов.

Были выполнены многочисленные работы по комплексной переработке пиритных концентратов и предложен ряд способов их рационального использования, некоторые из которых уже давно успешно осуществлены в промышленном масштабе в зарубежной практике.

В Японии фирмой «Кова Сейко» в Тобато был создан металлургический комплекс получения серной кислоты, железного концентрата и возгонов цветных металлов из высококачественных пиритных концентратов [2]. Способ включал окислительный обжиг концентрата в печах кипящего слоя при 900 °С и хлоридовозгонку окисленных огарков при температуре 1 250 °С.

В Италии действует завод по переработке пиритного концентрата, созданный фирмой «Монтекатини». Технологическая схема включает окислительный обжиг концентрата в печи кипящего слоя при 965 °С, восстановительный магнетизирующий обжиг горячего огарка в той же печи при 550 ÷ 650 °С, магнитную сепарацию с последующим окомкованием магнитной фракции. Данный способ обеспечивает получение готового для доменной плавки продукта с

содержанием железа 66 %. Серосодержащие отходящие газы используются для получения серной кислоты [3].

На заводе в Коккола (Финляндия) перерабатывается 300 тыс. т. в год чистых пиритных концентратов по способу плавки во взвешенном состоянии, разработанной фирмой «Оутокумпу-Ку» [4]. Способ обеспечивает получение железного концентрата, пригодного для выплавки стали, а также элементарной серы и серной кислоты.

В СССР из пиритного концентрата извлекалась сера в виде серной кислоты, а огарки миллионами тонн складировались в отвалах. Учитывая, что в огарок переходило большое количество железа, цветных и драгоценных металлов, а хранение отвалов с огарками вызывало затруднения, неоднократно принимались решения, направленные на комплексное использование пиритных концентратов.

Ведущими организациями СССР был выполнен большой объем исследований. Проведенные технико-экономические расчеты показали, что наиболее выгодным являются схемы, включающие процесс окислительного обжига перефлотированного концентрата и хлоридовозгонку огарка для извлечения цветных, редких и благородных металлов. Это позволило увеличить выпуск товарной продукции на 26 % [5].

За рубежом эффективность промышленной практики обеспечивается за счёт использования в качестве сырья высококачественных пиритных концентратов и применения методов, позволяющих получить элементарную серу или серную кислоту, кондиционный железный концентрат и цветные металлы, например, с помощью проведения обжига в кипящем слое [6].

Известно, что получение серной кислоты из диоксида серы требует преобразования SO_2 в SO_3 при помощи дорогостоящих ванадиевых или платиновых катализаторов, что существенно сказывается на экономической эффективности процесса.

Большие количества серного ангидрида образуются на ТЭЦ, сжигающих серосодержащие топлива (мазут, уголь). Оксиды серы, а также образующиеся при соединении в атмосфере с водяным паром кислоты (H_2SO_3 и H_2SO_4) оказывают вредное воздействие на здоровье людей, являются причиной гибели хвойных лесов, плодовых деревьев, снижения урожайности сельскохозяйственных культур, закисления водоемов. Кроме того, оксиды серы являются причиной коррозии стальных конструкций и разрушения различных строительных материалов. Большую опасность для окружающей среды представляют кислотные дожди.

Технология улавливания SO_2 с помощью известняка ($CaCO_3$ – карбонат кальция) по реакции $CaCO_3 + SO_2 + 1/2H_2O = CaSO_3 \cdot 1/2H_2O + CO_2$ приводит к получению некачественного гипса, а дальнейший перевод его в «настоящий» гипс ($CaSO_4$) связан в дополнительных расходами.



В работе [7] приводятся показатели процесса на основе пирометаллургического двухстадийного обжига концентрата пирита. В литературе имеются сведения о переработке пиритных концентратов также гидрометаллургическими методами [8]. В указанной работе приведена технология выщелачивания пирита в сульфатно-хлоридной среде в автоклаве и в атмосфере с высоким содержанием кислорода. При этом 20 % серы извлекается в элементарном виде, а остальное количество – в виде сульфата железа. Недостатком этой технологии является большое количество используемых жидких реагентов и кислорода, необходимость титановых реакторов, что усложняет и повышает стоимость процесса.

В Армении имеются большие ресурсы минеральных пород в виде сульфидов металлов: меди, молибдена, полиметаллов, пирита. Например, в республике содержится около 7 % мировых запасов молибдена в виде сульфида. Здесь давно освоено промышленное производство меди, молибдена, цинка, свинца и других металлов. Технология их добычи сводится к флотационному обогащению с получением концентратов и дальнейшей переработке исключительно пирометаллургическим методом с присущими ему указанными недостатками.

В связи с этим большой интерес может представлять новый метод переработки пиритных, и вообще всех серосодержащих концентратов, описанный в настоящей работе. Капанская лаборатория металлур-

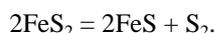
гии и обогащения Института химической физики НАН Армении им. А.Б. Налбандяна в течение многих лет успешно разрабатывает и испытывает принципиально новый метод переработки сульфидных концентратов, основанный на использовании водяного пара [9–16]. Работы лаборатории оценены специалистами ряда известных организаций в области металлургии, с которыми проводились совместные работы. Среди них ОАО «ГИНЦВЕТМЕТ» (Россия), Институт Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Институт тугоплавких металлов РАН, кафедра металлургии университете штата Юта (США). На 31-ой Международной выставке изобретений, новых технологий и продуктов, «ЖЕНЕВА – 2003», изобретение К.Е. Акопяна с соавторами, защищенное евразийским патентом, награждено серебряной медалью, а жюри специально подчеркнуло полную экологическую безопасность технологии, особенно благодаря предотвращению выделения сернистого ангидрида в атмосферу.

Цель настоящей работы – описать технологию переработки концентратов пирита Каджаранского месторождения Армении, которая предотвращает выброс диоксида серы в атмосферу и обеспечивает максимальное извлечение железа. Эта технология была давно изучена и известна как «метод Акопяна» [17–18], однако недавние исследования усовершенствовали этот метод и определили оптимальные режимы ее использования в пилотных установках.

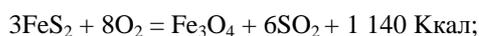
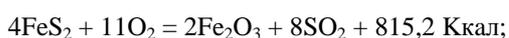
Список обозначений	
<i>Аббревиатуры</i>	
ОАО	Открытое акционерное общество
ТЭЦ	Теплоэлектростанция

2. Теоретический анализ

Известно, что в процессе обжига термическое разложение пирита происходит с образованием паробразной (сублимированной) серы:



Пары серы начинают гореть при 500 °С, формируя газ SO₂. Полученный сульфид железа также окисляется. Результирующие реакции окисления пирита кислородом воздуха, в зависимости от парциального давления кислорода и температуры, имеют следующий вид:

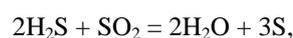


Поскольку все указанные реакции строго экзотермичны, то в процессе обжига генерируется значи-

тельное количества тепла, которое может быть использовано. Следует отметить, что окислы железа формируются в ряду FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃ по мере повышения температуры. Процесс обжига не обеспечивает комплексную переработку сырьевого концентрата, и шлаки-огарки используется не полностью. Потери серы составляют около 7 ÷ 10% в выхлопных газах и золе.

Процессы, протекающие при переработке пирита в атмосфере водяного пара, описываются следующими уравнениями [19]:

– при 400 ÷ 600 °С протекают реакции:



– и выше 700 °С:



Для оценки поведения сульфидов железа при взаимодействии пиритного концентрата в атмосфере



водяного пара был проведен расчет равновесного состава газовой и конденсированной фаз исследованной системы FeS_2-H_2O для интервала температур $500 \div 1\ 200$ °С. Расчеты были выполнены посред-

вом вариационного метода с помощью компьютерной программы.

В табл. 1 приведены составы модельных смесей «пирит – водяной пар».

Таблица 1

Составы исходных смесей системы $FeS_2 - H_2O$

Table 1

Compositions of the initial mixtures of the system $FeS_2 - H_2O$

Состав	Состав смеси					
	Моли		Г · атом/кг			
	FeS_2	H_2O	Fe	S	H	O
1	1	1	7,2466	14,493	14,497	7,2488
2	3	4	6,9443	13,888	18,523	9,2616
3	3	40	2,7758	5,5517	74,043	37,021

Расчеты показали, что теоретически оптимальное соотношение $FeS_2:H_2O$ в исходной смеси относительно выхода магнетита и степени десульфуризации составляет 3:40. Железо в равновесной конденсированной фазе может присутствовать в виде пирита, пирротина и магнетита, основными компонентами равновесной газовой фазы являются водяной пар, сероводород, оксиды серы, элементарная сера и водород. Парциальное давление элементарной серы в равновесной газовой фазе уменьшается с повышением содержания водяного пара в исходной смеси и растет с температурой. Выход элементарной серы в равновесную газовую фазу при 1 200 °С для всех исследованных смесей составляет 18 ÷ 24%. Соотношение парциальных давлений сероводорода и оксидов серы в равновесной газовой фазе изменяется в

зависимости от содержания водяного пара в исходной смеси.

В равновесных конденсированных фазах составов 1 и 2 при температуре выше 700 °С образуется только пирротин. При повышении содержания водяного пара в исходной смеси в 10 раз по сравнению с составом 2 уже при 500 °С в равновесной конденсированной фазе наряду с пирритом и пирротинном содержится магнетит, с которым связано около 22 % железа. Выход магнетита увеличивается с ростом температуры и достигает 100 % при 1 100 °С, то есть в этих условиях термодинамически возможна полная десульфуризация пирита водяным паром с образованием магнетита. На рис. 1 показана зависимость содержания магнетита от температуры при мольном содержании $FeS_2: H_2O$ в исходной смеси 3:40.

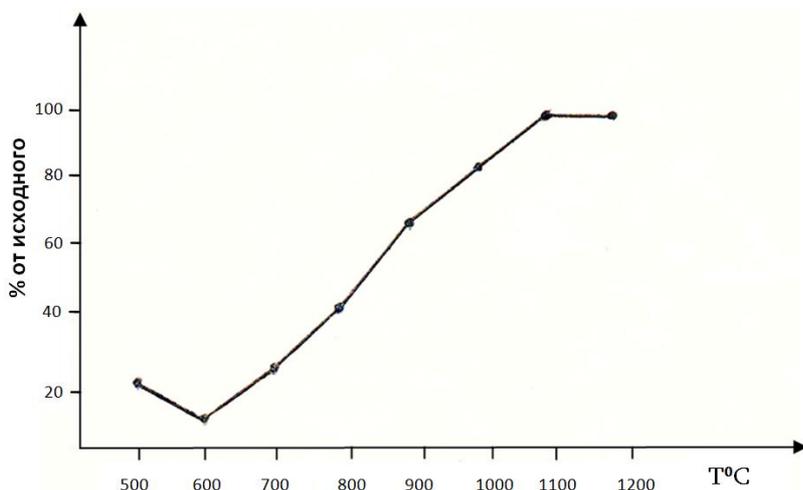


Рис. 1 – Зависимость равновесной концентрации магнетита от температуры при мольном соотношении $FeS_2: H_2O$ в исходной смеси 3:40
 Fig. 1 – Dependence of the equilibrium concentration of magnetite on the temperature at mole ratio of $FeS_2: H_2O$ in the initial mixture of 3:40

Проведенные расчеты позволили оценить условия, при которых термодинамически возможна полная десульфуризация сульфида железа водяным паром, определить равновесные составы газовой и конденсированной фаз и выбрать оптимальные условия для экспериментального осуществления процесса десульфуризации пиритного концентрата с максимальным выходом железа.

3. Эксперимент

Процесс переработки концентрата пирита водяным паром был реализован в лабораторной установке с горизонтальными и вертикальными реакторами. Использовался концентрат пирита Каджаранского месторождения со следующим составом (%): Fe – 44,1; S – 49,4; Cu – 0,35; Zn – 0,02; Pb – 0,02; Mo – 0,1; As – 0,035; SiO_2 – 2,1; CaO – 0,7; TiO_2 – 0,25.

Минералогический анализ показал, что кроме пирита в концентрате находится халькопирит, молибденит, магнетит, кварц, полевой шпат и незначительные примеси других минералов. Процесс переработки пирита исследовался в температурном диапазоне от $200 \div 1\ 000$ °С. Были изготовлены образцы в виде порошка и гранул, вес которых варьировался в диапазоне $1 \div 200$ г, размер гранул составлял $0,5 \div 6$ мм. Образцы помещали в герметичный кварцевый реактор, продували инертным газом и нагревали до нужной температуры. Отходящие газы охлаждались при $30 \div 60$ °С путем водной конденсации, а затем на-

правлялись в поглотители, заполненные адсорбирующими растворами для селективного разделения сероводорода и водорода, который после осушки использовался для восстановления оксидов. Затем необходимое количество водяного пара или газообразного водорода подавали в реактор. Управляли процессом с помощью анализатора сероводорода в выделяющихся газах в хроматографе, также проводился их химический анализ. Кроме того, был проведен химический и рентгенографический анализ твердых продуктов реакций. Были разработаны три варианта переработки, один из которых показан на рис. 2.

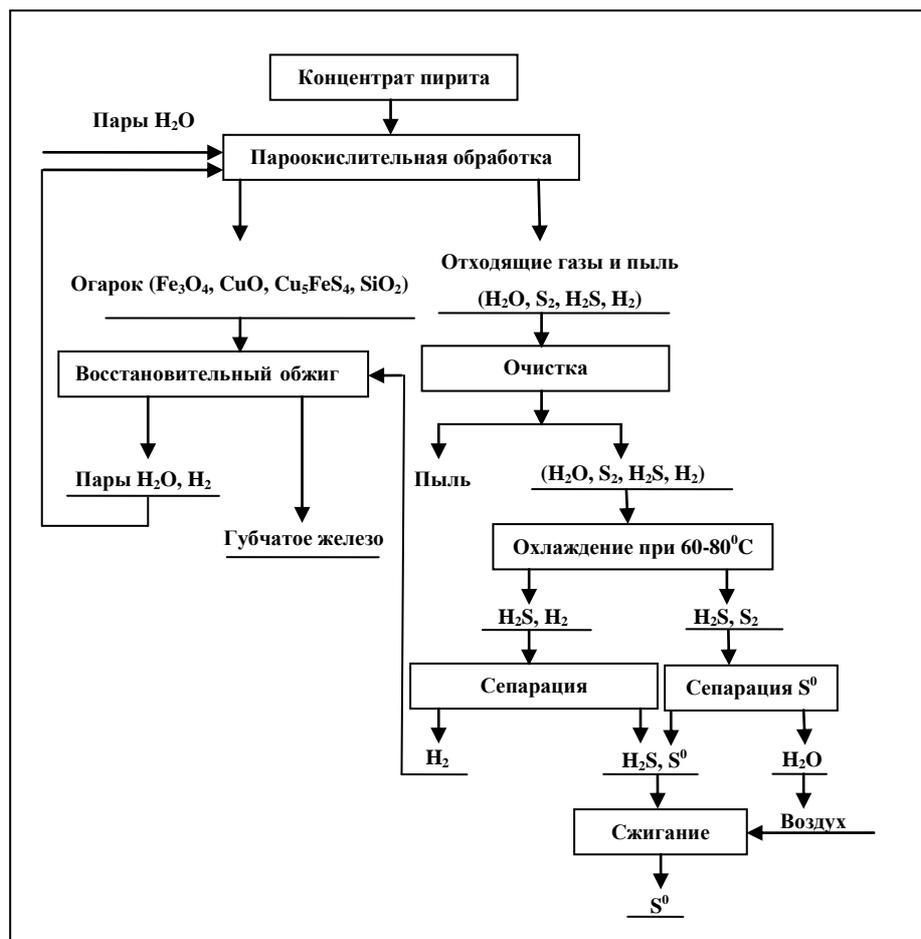


Рис. 2 – Технологическая схема переработки концентрата пирита парами воды
Fig. 2 – Technological scheme for the processing of pyrite concentrate with water vapor

Средний химический состав полученного огарка (в % по массе) был следующим: Fe – 65,6; S – 0,3; Cu – 0,32; Zn – 0,01; Pb – 0,001; B – 0,001; SiO₂ – 1,7; CaO – 0,85; Al₂O₃ – 0,9; TiO₂ – 0,27. Степень десульфуризации – $98 \div 99$ %. После охлаждения выделяющихся газов при $60 \div 80$ °С вода отделялась, и затем элементарную серу и смесь сероводорода с водородом пропускали через 40 % раствора гидроксида натрия. В результате реакции $2\text{NaOH} + \text{H}_2\text{S} = \text{Na}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ образовывался $18 \div 20$ % раствор

сульфида натрия. Это соединение является очень важным в качестве флотационного реагента, что было протестировано в лаборатории Зангезурского медно-молибденового комбината. Соединение было использовано как депрессор в процессе производства коллективного медно-молибденового концентрата, и его качество было оценено как очень хорошее. Другие полезные металлы извлекали с помощью стандартных методов электрохимического осаждения или посредством изменения pH раствора.

В конце проводилось восстановление полученных оксидов железа в токе водорода при $800 \div 1\ 000\ ^\circ\text{C}$, что позволило получить губчатое железо с минимальным содержанием вредных примесей.

В табл. 2 приведены железистые продукты реакции пирита с водяным паром в зависимости от температуры процесса. Из таблицы следует, что уже при температуре $900 \div 950\ ^\circ\text{C}$ сульфид железа превращается в гематит и магнетит.

Степень десульфуризации исходного концентрата пирита в зависимости от продолжительности и температуры процесса показана на рис. 3.

Таблица 2
Продукты реакции в зависимости от температуры процесса [15]
Table 2
Reaction products in dependence of process temperature [15]

$t, ^\circ\text{C}$	Обнаруженные соединения железа
20	FeS_2
200	$\text{FeS}_2, \text{FeS}_x (1 < x < 2)$
300	$\text{FeS}_2, \text{FeS}_x (1 < x < 2)$
400	$\text{FeS}_2, \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
500	$\text{Fe}_7\text{S}_8, \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
600	$\text{Fe}_7\text{S}_8, \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
700	$\text{Fe}_7\text{S}_8, \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$
800	$\text{Fe}_7\text{S}_8, \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$
900	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$
950	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$

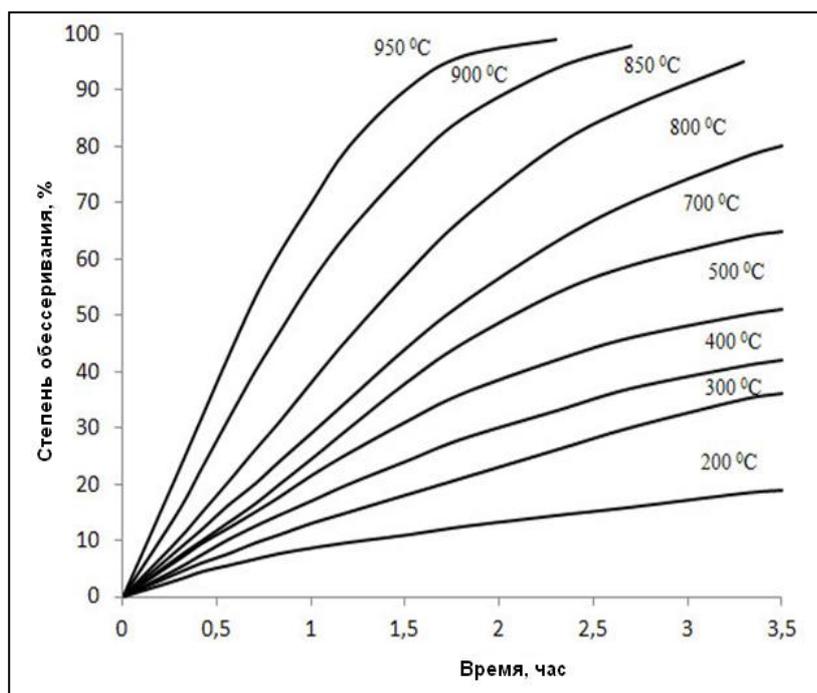


Рис. 3 – Зависимость степени десульфуризации от продолжительности процесса и от температуры [15]
Fig. 3 – Dependence of the degree of desulfurization on the duration of the process and temperature [15]

Что касается других драгоценных и цветных металлов, содержащихся в концентрате, то их извлечение из огарка представляет известную задачу, осуществляемую химическими и электрохимическими методами.

4. Заключение

Технология обработки концентрата пирита водяным паром была апробирована в пилотной установке. Было доказано, что этот метод приводит к полному извлечению и разделению серы. Кроме того, была достигнута высокая степень извлечения железа и других элементов, содержащихся в концентрате.

В процессе окисления концентрата пирита парами воды скорость десульфуризации зависит от температуры реактора, площади поверхности обрабаты-

ваемого концентрата, контролирования газообразных продуктов реакции, а также от размера частиц.

3. Оптимальные технические характеристики процесса окисления концентрата водяным паром в изолированном реакторе следующие:

- температура переработки $900 \div 1\ 000\ ^\circ\text{C}$;
- потребление пара на тонну концентрата составляет $4 \div 6\ \text{т}$;
- температура нагретого пара – $1\ 000 \div 1\ 050\ ^\circ\text{C}$;
- время обработки составляет $3 \div 4,5$ часов;
- степень десульфуризации $94 \div 96\ \%$, причем доля элементарной серы составляет $11 \div 13\ \%$, и $87 \div 89\ \%$ образуется в виде сульфида натрия – ценного продукта, используемого при флотации рудных материалов.

Восстановление водородом огарка обеспечивает формирование губчатого железа, которое рассматри-

вается как необходимый материал для выплавки чугуна и различных видов сталей.

Технология переработки является экологически безопасной.

Полученные результаты могут служить в качестве основы для крупномасштабной обработки любого вида концентрата пирита, в частности, на Зангезурском медно-молибденовом комбинате и в других региональных центрах, где может быть переработано большое количество концентрата пирита с получением губчатого железа и с сохранением окружающей среды от вредных выбросов сернистого ангидрида.

Список литературы

[1] World – Pyrites – Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.indexbox.io/store/world-pyrites-market-report-analysis-and-forecast-to-2020> – (Дата обращения: 15.12.18).

[2] Добросельская, Н.П. Комплексная переработка пиритов на новых Японских заводах «Оксяма» и «Амагасаки» / Н.П. Добросельская, Е.И. Новикова, Г.Р. Певзнер // Бюлл. ЦИИИ ЦМ. – 1972. – № 22. – С. 34.

[3] Терновская, А.Н. Комплексная переработка пиритных концентратов и огарков / А.Н. Терновская [и др.] // Химическая промышленность. – 1972. – № 10. – С. 30.

[4] Ушаков, К.И. Процесс в Коккола и возможность его применения в СССР / К.И. Ушаков, З.Л. Берлин В.А. Пуговкин // Цветные металлы. – 1968. – № 2. – С. 43.

[5] Резник, И.Д. Экономическая эффективность переработки пиритных концентратов / И.Д. Резник [и др.] // Цветные металлы. – 1971. – № 5. – С. 13.

[6] Runkel, M. Pyrite roasting, an alternative to sulphur burning / M. Runkel, P. Sturm // SAJMM Journal. – 2009. – Vol. 109. – No. 8. – P. 491.

[7] Chepushtanova, T. Processing of the Pyrite Concentrates to Generate Sulfurous Anhydride for Sulfuric Acid Production / T. Chepushtanova, V.A. Lukanov // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2007. – Vol. 6. – No. 2. – P. 103–108.

[8] de-Friedberg H.S., Pyrite Leaching Behaviour under CESL Process Conditions [E-resource] / H.S. de-Friedberg. Available on: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.731.9102&rep=rep1&type=pdf> – (Дата обращения: 03.12.18).

[9] Hakobyan, K.E. Method of Molybdenum Sulfide Concentrate Treatment / K.E. Hakobyan [et al.] // Eurasia Patent No. 002417. – 2002. МКИ C22B1/02; C22B1/04; C22B34/34; C22B61/00.

[10] Blanco, E., Oxidation of Molybdenite by Water Vapor / E. Blanco [et al.] // Proceedings of the Sohn International Symposium, TMS 2006, Warrendale, Pennsylvania (USA). – 2006. – Vol. 1. – P.167–172.

[11] Hakobyan, K.E. New Technology for the Treatment of Molybdenum Sulfide Concentrates / K.E. Hakobyan [et al.] // Proceedings of the Sohn International Symposium, TMS, Warrendale, Pennsylvania (USA). – 2006. – vol. 4. – P. 203–216.

[12] Hakobyan, K.E. The oxidation of Molybdenum Sulfide Concentrate with Water Vapor. Part 1. Thermodynamic Aspects / K.E. Hakobyan [et al.] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy (TIMM C). – 2007. – Vol. 116. – No. 3. – P.152–154.

[13] Hakobyan, K.E. The Oxidation of Molybdenum Sulfide Concentrate with Water Vapor: Part 2. Macrokinetics and Mechanism / K.E. Hakobyan [et al.] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy (TIMM C). – 2007. – Vol. 116. – No. 3. – P. 155–158.

[14] Hakobyan, K.E. Optimal Operation Regimes of Pilot Plant for Processing Sulfide Concentrates by New Vapor-Oxidative Method / K.E. Hakobyan [et al.] // Proceedings of MMM2013 International Symposium, August 25–28, 2013, San Diego, California, USA. – 2013. – P. 253–257.

[15] Hakobyan, K.E. The Ways of Complex Processing of Pyrite Concentrates / K.E. Hakobyan, A.K. Hakobyan, A.A. Melkomyan, G.G. Karamyan // Proceedings of MMM2013 International Symposium, August 25–28, 2013, San Diego, California, USA. – 2013. – P. 321–324.

[16] Hakobyan, K.E. Physico-Chemical Basis and Development of Waste-Free Technology of Integrated Processing of Collective Polymetallic Concentrates / K.E. Hakobyan [et al.] // Proceedings of Shechtman International Symposium, Cancun, Mexico, 29 June – 04 July, 2014. Vol. 2: MINERAL PROCESSING, – 2014. – P. 361–366.

[17] Акопян, К.Е. Способ Акопяна К.Е. Переработка пиритного концентрата А.С. СССР, N815055, опубл. в Б.И. – 1981. – № 11.

[18] Смирнов, И.И. Парометаллургия – перспективное направление в цветной металлургии / И.И. Смирнов и др. – Изд. Красноярского ун-та, Красноярск, 1987. – С. 165–167. (в книге приводится более подробная информация о «методе Акопяна»).

[19] Павелко, Г.Ф. Механохимические реакции элементарной серы и сульфидов железа с водородом, кислородом и водой / Г.Ф. Павелко // Российский Журнал неорганической химии. – 2008. – Т. 53. – Вып. 7. – С. 981–987.



References

- [1] World – Pyrites – Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights. Available on: <https://www.indexbox.io/store/world-pyrites-market-report-analysis-and-forecast-to-2020> (12.15.18).
- [2] Dobroselskaya N.P., Novikova E.I., Pevzner G.R. Complex pyrite processing at the new Japanese plants Oksiyama” and “Amagasaki” (Kompleksnaya pererabotka piritov na novih Yaponskih zavodah Oksiyama i Amagasaki). *Bull. CIIN CM*, 1972;22:34 (in Russ.).
- [3] Ternovskaya A.N. et al. Complex processing of pyrite concentrates and stubs. (Kompleksnaya pereraborka piritnih kontcentratov i ogarkov). *Chemical industry*, 1972;10:30 (in Russ.).
- [4] Ushakov K.I., Berlin Z.L., Pugovkin V.A. The process in Kokkola and the possibility of its use in the USSR (Protces Kokkola i vozmozhnosti ego ispolzovaniya v SSSR). *Non-ferrous metals*, 1968;2:43 (in Russ.).
- [5] Reznik I.D. et al. The economic efficiency of the processing of pyrite concentrates (Economicheskaya effektivnost’ pererabotki piritnih kontcentratov). *Non-ferrous metals*, 1971;5:13 (in Russ.).
- [6] Runkel M., Sturm P. Pyrite roasting, an alternative to sulphur burning. *SAIMM Journal*, 2009;109(8):491.
- [7] Chepushtanova T., Luganov V.A. Processing of the Pyrite Concentrates to Generate Sulfurous Anhydride for Sulfuric Acid Production. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2007;6(2):103–108.
- [8] de-Friedberg H.S., Pyrite Leaching Behaviour under CESL Process Conditions. Available on: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.731.9102&rep=rep1&type=pdf> (12.03.18).
- [9] Hakobyan K.E., Kovgan P.A., Tarasov A.V. and Hakobyan A.K. Method of Molybdenum Sulfide Concentrate Treatment. Eurasia Patent No. 002417. – 2002. IPC C22B1/02; C22B1/04; C22B34/34; C22B61/00.
- [10] Blanco E., Sohn H.Y., Han G., Hakobyan K.Y. Oxidation of Molybdenite by Water Vapor. *Proceedings of the Sohn International Symposium, TMS 2006, Warrendale, Pennsylvania (USA)*, 2006;1:167–172.
- [11] Hakobyan K.E., Sohn H.Y., Tarasov A.V., Kovgan P.A., Hakobyan A.K., Bryukvin V.A., Leontiev V.G., Tsybine O.I. New Technology for the Treatment of Molybdenum Sulfide Concentrates. *Proceedings of the Sohn International Symposium, TMS, Warrendale, Pennsylvania (USA)*, 2006;4:203–216.
- [12] Hakobyan K.E. et al. The oxidation of Molybdenum Sulfide Concentrate with Water Vapor. Part 1. Thermodynamic Aspects. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (TIMM C)*, 2007;116(3):152–154.
- [13] Hakobyan K.E. et al. The Oxidation of Molybdenum Sulfide Concentrate with Water Vapor: Part 2. *Macrokinetics and Mechanism. Mineral Processing and Extractive Metallurgy (TIMM C)*, 2007;116(3):155–158.
- [14] Hakobyan K.E. et al. Optimal Operation Regimes of Pilot Plant for Processing Sulfide Concentrates by New Vapor-Oxidative Method. *Proceedings of MMM2013 International Symposium, August 25–28, 2013, San Diego, California, USA*, 2013: 253–257.
- [15] Hakobyan K.E., Hakobyan A.K., Melkomyan A.A., Karamyan G.G. The Ways of Complex Processing of Pyrite Concentrates. *Proceedings of MMM2013 International Symposium, August 25–28, 2013, San Diego, California, USA*, 2013:321–324.
- [16] Hakobyan K.E. et al. Physico-Chemical Basis and Development of Waste-Free Technology of Integrated Processing of Collective Polymetallic Concentrates. *Proceedings of Shechtman International Symposium, Cancun, Mexico, 29 June – 04 July, 2014. Vol. 2: MINERAL PROCESSING*, 2014:361–366.
- [17] Hakobyan K.E. The Hakobyan’s method of processing of pyrite concentrate. (Metod Akopyana pererabotki piritnogo kontcentrata). Certificate of authorship USSR, N815055, publ. in Invention Bulletin –1981. – No. 11 (in Russ.).
- [18] Smirnov I.I. et al. Parometallurgy – a promising direction in the non-ferrous metallurgy (Parometalurgiya – perspektivnoe napravlenie v tvetnoy metalurgii). Krasnoyarsk University, 1987; pp. 165–167. (The book contains more detailed information about the “Hakobyan’s method”) (in Russ.).
- [19] Pavelko G.F. Mechanochemical reactions of elemental sulfur and iron sulfides with hydrogen, oxygen and water (Mehanohimicheskiye reakcii elementarnoy seri i sulfidov zheleza s vodorodom, kislorodom i vodoy). *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2008;53(7):981–987 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

