

УДК 66.061.34+579.66

## ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЦИДОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

© 2013 г. М. И. Муравьев, Н. В. Фомченко

Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, Москва, 117312

e-mail: maxmuravyov@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2013 г.

Исследован процесс выщелачивания меди и цинка из медеплавильного конвертерного шлака серноокислыми растворами сульфата трехвалентного железа, полученными с использованием ассоциации ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов. Выбраны лучшие параметры химического выщелачивания: температура 70°C, начальная концентрация трехвалентного железа в выщелачивающем растворе 10.1 г/л, содержание твердой фазы в суспензии 10%. Проведение процесса при указанных параметрах обеспечивало извлечения меди в раствор 89.4, цинка – 39.3%. Показана возможность биорегенерации трехвалентного железа в растворе, полученного после химического выщелачивания шлака, железосоокисляющими ацидофильными хемолитотрофными микроорганизмами без ингибирования их активности.

DOI: 10.7868/S0555109913060135

Шлаки являются отходом пирометаллургической переработки сульфидного сырья цветных металлов. В среднем при производстве 1 т меди образуется 2.2 т шлака, а годовое производство медеплавильных шлаков в мире составляет около 25 млн т [1]. Шлаки могут рассматриваться как техногенное сырье цветных металлов, содержание которых часто превышает содержание их в перерабатываемых рудах. Кроме того, высокая стоимость цветных металлов делает переработку подобного сырья экономически привлекательной.

В настоящее время в промышленном масштабе используются два способа переработки конвертерных медеплавильных шлаков: восстановительно-сульфидирующий способ обеднения в электропечах [2] и флотационное обогащение [3], при этом первый является преобладающим. Получаемые при этом обогащенные металлами продукты подвергаются дальнейшей переработке [4] или возвращаются на плавку, а отходы укладываются в отвалы.

Гидрометаллургические способы извлечения ценных компонентов из шлаков являются перспективным направлением их переработки. К ним относятся: выщелачивание с применением хлората [5], пероксида водорода [6], растворами серной кислоты [7], сульфатом или хлоридом трехвалентного железа [8–10], дихроматом калия [11], водными растворами диоксида серы [12, 13]. Ни один из указанных выше способов не нашел промышленного применения вследствие высокой стоимости и токсичности реагентов, а также технологических свойств получаемых продуктов.

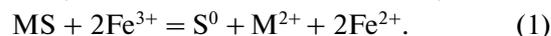
При переработке отходов образуются сточные воды, утилизация которых может являться более серьезной экологической задачей, нежели хранение в отвалах самих шлаков.

Выщелачивание отходов цветной металлургии с применением ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов может являться перспективным способом переработки указанного техногенного сырья.

Известен процесс двухстадийного выщелачивания сульфидных концентратов цветных металлов с использованием ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов [14, 15]. На первой стадии проводится выщелачивание металлов раствором сульфата трехвалентного железа, полученного биоокислением. При этом содержание твердой фазы может быть намного выше, чем в традиционной биогидрометаллургической технологии, а температура процесса – до 80°C, что значительно повышает его скорость. На второй стадии осуществляется главным образом регенерация трехвалентного железа. Процесс регенерации ведется различными сообществами ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов.

Химизм процессов может быть выражен уравнениями:

1 стадия (химическое выщелачивание):



2 стадия (регенерация окислителя – биоокисление):



где М – металл.

Разделение процесса на химическую и биологическую стадии позволяет создать условия, интенсифицирующие протекание как химических процессов окисления минералов, так и биоокисления.

Представленный способ выщелачивания цветных металлов достаточно гибкий и может быть применен практически к любому сырью, содержащему цветные металлы в составе сульфидных минералов, в том числе и конвертерным шлакам медеплавильных заводов.

Ранее было исследовано химическое выщелачивание хвостов флотационного обогащения конвертерных медеплавильных шлаков [16] сульфатом трехвалентного железа, полученного с помощью микроорганизмов.

Установлено, что лучшими технологическими параметрами процесса химического выщелачивания в периодическом режиме были: плотность пульпы 30%, значение pH 1.5, температура 70°C, начальная концентрация ионов трехвалентного железа 15.7 г/л, отсутствие аэрации, продолжительность 1.5 ч. При этом достигалось извлечение меди и цинка в раствор 81.6 и 37.7% соответственно при относительно небольшом извлечении железа — 26.2%. Содержание металлов в выщелоченном осадке составляло 0.13% Cu и 3.69% Zn. Увеличение температуры выше 70°C нецелесообразно вследствие интенсивного растворения силикатов с образованием геля.

Большее содержание меди в самих шлаках по сравнению с отходом флотационного обогащения делает их более привлекательным сырьем для двухстадийной гидрометаллургической переработки. Кроме того, представляет интерес исследование биорегенерации выщелачивающего раствора с применением ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов.

Цель работы — исследование выщелачивания цветных металлов из медеплавильного конвертерного шлака серноокислыми растворами трехвалентного железа, полученными с использованием ассоциаций ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, и биорегенерации полученного раствора.

## МЕТОДИКА

**Характеристика шлака.** Основную часть медеплавильного конвертерного шлака составляют магнетит  $Fe_3O_4$ , фаялит  $Fe_2SiO_4$ , а также стекло в сростании с ферритами и силикатами цинка. Медные минералы представлены включениями и сростаниями со стеклом дигенита, борнита, халькопирита, и металлической меди. Вид минералов шлака, полученных в сканирующем электронном микроскопе JSM-5610LV (“JEOL”, Япония), представлен на рис. 1. Содержание в пробе класса — 0.071 мм составляет 95%. Химический состав

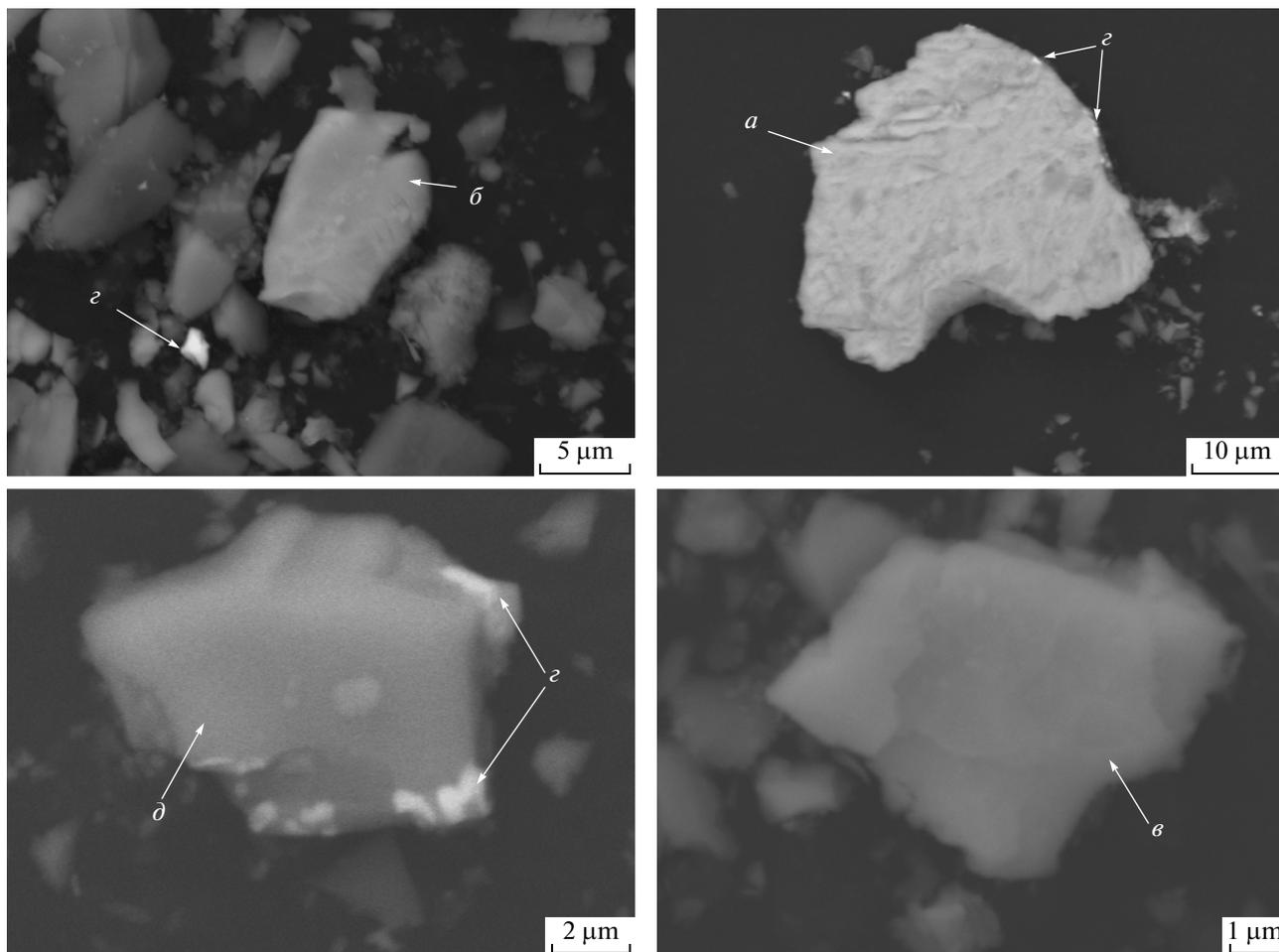
шлака следующий (%): железо (42.7), медь (2.74), цинк (2.49), сера (5.0), диоксид кремния (20.2).

**Получение выщелачивающего раствора.** В качестве инокулята для получения раствора, содержащего трехвалентное железо для химического выщелачивания, использовали ассоциацию микроорганизмов, включающую бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Sulfobacillus thermotolerans*, *Leptospirillum ferrooxidans*. Биоокисление двухвалентного железа проводили в бутылках объемом 5 л, содержащими 4 л жидкости при 40°C и аэрации 4 мин<sup>-1</sup>. Окисление соли  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  осуществляли в среде 9K [17]. Значения pH поддерживали на уровне 1.5 добавлением 98.5%-ной  $H_2SO_4$ . Конечная концентрация  $Fe^{3+}$  составила 33.6 г/л. После разведения дистиллированной водой до необходимой концентрации  $Fe^{3+}$  полученный раствор был использован для химического выщелачивания шлака.

**Химическое выщелачивание.** Выщелачивание проводили в периодическом режиме в реакторах объемом 2 л, содержащими 1 л пульпы. Температуру поддерживали с помощью U-образного теплообменника, соединенного с ультратермостатом. Скорость вращения закрытой турбинной мешалки составляла 760 мин<sup>-1</sup>. Шлак добавляли в выщелачивающий раствор, предварительно нагретый до необходимой температуры. Значение pH поддерживали на уровне 1.5 добавлением 98.5%-ной серной кислоты.

**Биорегенерация.** Для исследований процесса окисления ионов двухвалентного железа в рабочем растворе (биорегенерация) были созданы две ассоциации микроорганизмов. Первая ассоциация — мезофильная, культивирующаяся при 30°C, вторая — умеренно термофильная, культивирующаяся при 40°C. Для создания мезофильной ассоциации были использованы музейные штаммы *Acidithiobacillus ferrooxidans* TFBk, TFV-1, TFUch, TFUd-5, TFSib, а также мезофильная накопительная культура, поддерживаемая на медном концентрате Удоканского месторождения. Для создания умеренно термофильной ассоциации использовались музейные штаммы бактерий *S. thermotolerans* Kr1<sup>T</sup>, *S. sibiricus* N1<sup>T</sup>, *S. therosulfidooxidans* ВКМ В-1269<sup>T</sup>, штаммы бактерий рода *Sulfobacillus* Sh1, Sh8, а также умеренно термофильные накопительные культуры, поддерживаемые на медно-цинковом промпродукте Учалинского месторождения и на медном концентрате Удоканского месторождения. Опыты по окислению ионов железа проводились в конических колбах объемом 250 мл с объемом жидкости в них 100 мл на термостатируемых качалках с числом оборотов 150 мин<sup>-1</sup>.

**Аналитические методы.** Значения pH определяли с помощью pH-метра pH-150МА (Беларусь). Концентрации  $Fe^{3+}$  и  $Fe^{2+}$  в жидкой фазе опреде-



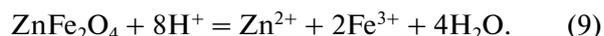
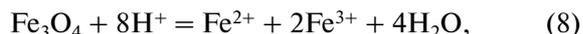
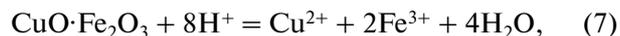
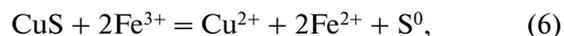
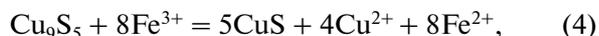
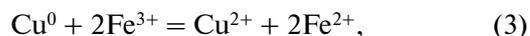
**Рис. 1.** Вид минералов медеплавильного конвертерного шлака в сканирующем электронном микроскопе: борнит (а), халькопирит (б), дигенит (в), галенит (г), франклинит (д).

ляли колориметрическим методом с роданидом калия [18] с использованием фотометра КФК-3 (Россия) при длине волны 475 нм. Концентрацию ионов меди и цинка определяли на атомно-абсорбционном спектрометре с пламенной атомизацией Perkin Elmer 3100 (США). Содержание металлов в твердой фазе определяли растворением последней в смеси концентрированных соляной и азотной кислот (3 : 1) с добавлением фторида аммония при кипячении с последующим определением концентрации металлов в растворе атомно-абсорбционным методом.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ показывает, что основная часть меди в конвертерных шлаках сосредоточена в сульфидах в сростках со стеклом, окисленных минералах и металлической форме [8], которые окисляются растворами сульфата трехвалентного железа, переходя в раствор.

Химическое выщелачивание цветных металлов из конвертерного шлака основано на протекании реакций окисления или растворения металлической меди, дигенита, борнита, магнетита, а также ферритов цинка:



Вместе с тем конвертерные шлаки медеплавильных заводов – особый вид продукта, содержащий до 50% железа преимущественно в составе магнетита и силиката (фаялит), а также силикаты других металлов (в частности, цинк). Растворение силикатов в сернокислой среде, используемой

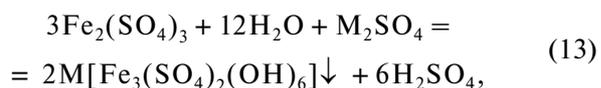
при выщелачивании, может приводить к образованию силикатного геля в соответствии с уравнениями реакций:



где М – металл (Fe, Zn, Cu и др.).

Силикатный гель затрудняет или делает невозможным дальнейшие операции разделения (фильтрование, отстаивание) фаз и выделения цветных металлов из растворов (жидкостная экстракция, химическое осаждение и др.). Поэтому процесс извлечения цветных металлов из шлаков цветной металлургии должен характеризоваться условиями, позволяющими перевести в раствор цветные металлы при минимальном растворении силикатной фазы.

Кроме того, чем выше температура и рН пульпы, тем интенсивнее протекает реакция с образованием ярозита [19]:



где М = K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>.

Ранее было показано, что выщелачивание цветных металлов из отхода обогащения конвертерных шлаков достаточно эффективно протекает при рН 1.5, содержании твердой фазы в суспензии от 5 до 30% и концентрации ионов трехвалентного железа в исходном растворе 10–20 г/л [16]. Поэтому для исследования выщелачивания цветных металлов непосредственно из медеплавильных шлаков были использованы результаты этих опытов.

**Влияние температуры.** Как известно, наибольшее влияние на скорость химических реакций оказывает температура. Ранее проведенные исследования показали положительное влияние повышения температуры на процесс выщелачивания цветных металлов из хвостов обогащения конвертерных шлаков. Для подтверждения полученных результатов были проведены исследования по определению влияния температуры на динамику выщелачивания цветных металлов из шлака.

Опыты проводили при следующих параметрах: значении показателя рН 1.5, начальной концентрации ионов трехвалентного железа в выщелачивающем растворе 15.1 г/л и плотности пульпы 5%.

Извлечение меди и цинка в процессе выщелачивания конвертерного шлака представлено на рис. 2. Видно, что около 50% меди переходило в раствор в первые 5 мин процесса, и влияние температуры было незначительным. Это можно объяснить тем, что сначала реагируют окисленные

минералы меди и металлическая медь, которые растворяются наиболее быстро. Однако в течение последующих 2.5 ч при низкой (28–40°C) температуре медь практически не выщелачивалась, в то время как при температуре 70°C извлечение меди достигало почти 95%. Подобные закономерности наблюдались при выщелачивании цинка. Около 10–15% цинка переходило в раствор в первые 5 мин процесса, и влияние температуры было незначительным. Повышение температуры до 70°C обеспечивало самые высокие показатели по сравнению с более низкими температурами, однако извлечение цинка не превышало 46% за 2.5 ч.

Из представленных данных на рис. 2 и 3 видно, что с увеличением температуры увеличивалась интенсивность и эффективность извлечения меди и цинка. Повышение температуры процесса от 40 до 70°C приводило к увеличению извлечения меди более чем в 1.5 раза, цинка – почти в 3 раза за 2.5 ч процесса. Результаты проведенных исследований подтвердили полученные ранее закономерности при выщелачивании отхода обогащения шлаков по положительному влиянию температуры на извлечение цветных металлов в раствор.

**Влияние концентрации ионов трехвалентного железа.** Опыты проводили при значении рН 1.5, содержании твердой фазы в суспензии 20% и температуре 70°C. В реактор заливали выщелачивающий раствор, содержащий ионы трехвалентного железа с их начальной концентрацией 10.1 г/л, 15.1 г/л и 20.6 г/л.

Результаты исследований представлены на рис. 3. Показано, что около 50% меди также переходило в раствор в первые 5 мин процесса, в то время как извлечение цинка не превышало 10%. При этом повышение концентрации ионов трехвалентного железа в выщелачивающем растворе увеличивало извлечение меди в раствор и снижало извлечение цинка, особенно в первые 30 мин. Полученные результаты можно объяснить тем, что ионы трехвалентного железа являются реагентами в реакциях выщелачивания меди (3–6), увеличение концентрации которых увеличивает интенсивность реакций, в то время как в реакциях выщелачивания цинка и железа (8, 9), они являются продуктами, увеличение концентрации которых ингибирует эти реакции.

Сравнение процессов, проводимых при начальной концентрации трехвалентного железа 10.1 и 20.6 г/л, указывает на более высокую эффективность извлечения меди в последнем случае, однако концентрация 15.1 г/л Fe<sup>3+</sup> обеспечивала также высокие показатели по извлечению цветных металлов.

**Влияние содержания твердой фазы в суспензии.** Гидродинамический режим в реакторе – важный параметр химических процессов. Он играет ключевую роль при протекании реакций, контролируемых скоростью диффузионных процессов. Одним

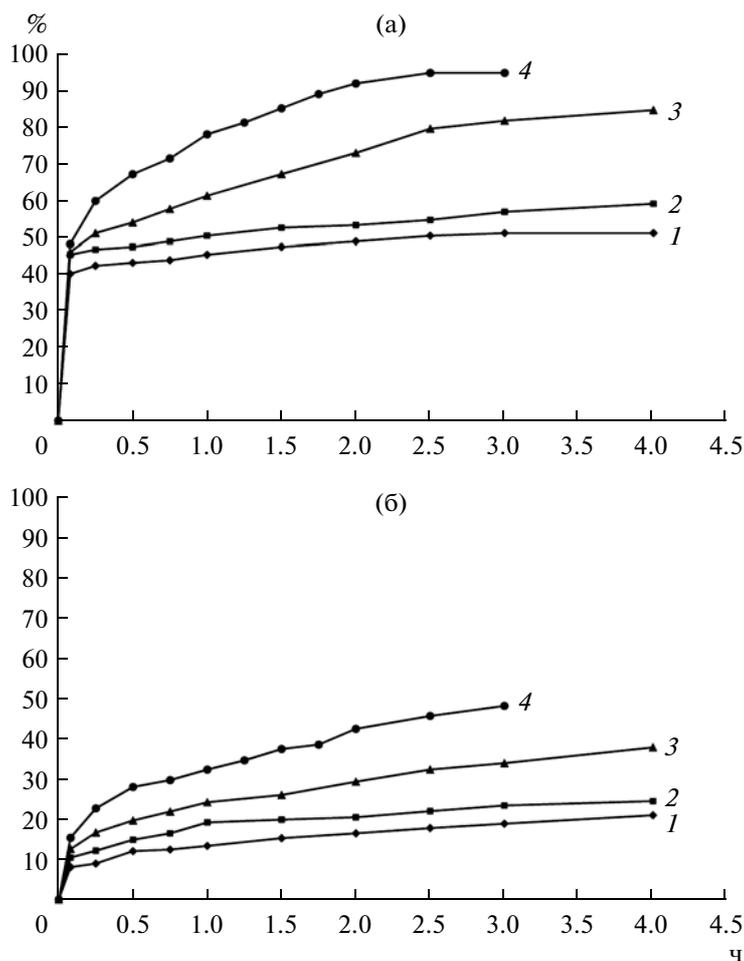


Рис. 2. Извлечение меди (а) и цинка (б) в процессе химического выщелачивания конвертерного шлака при различной температуре: 1 – 28, 2 – 40, 3 – 55, 4 – 70°C.

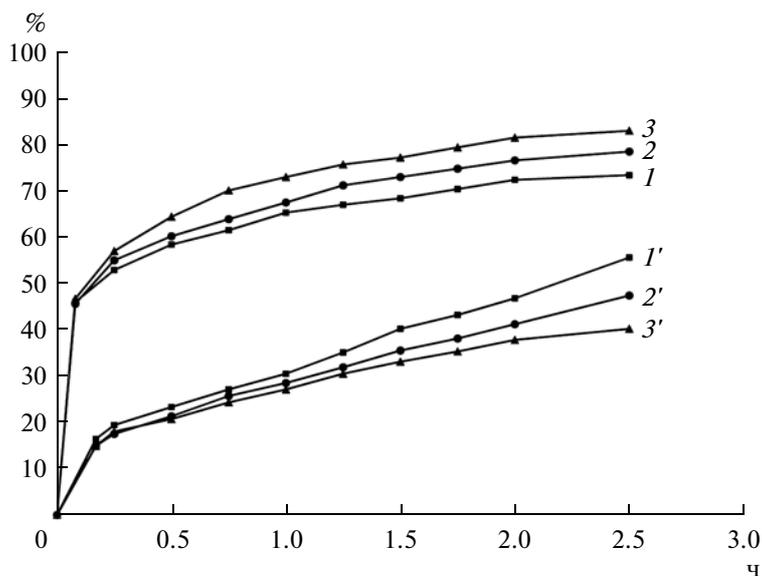
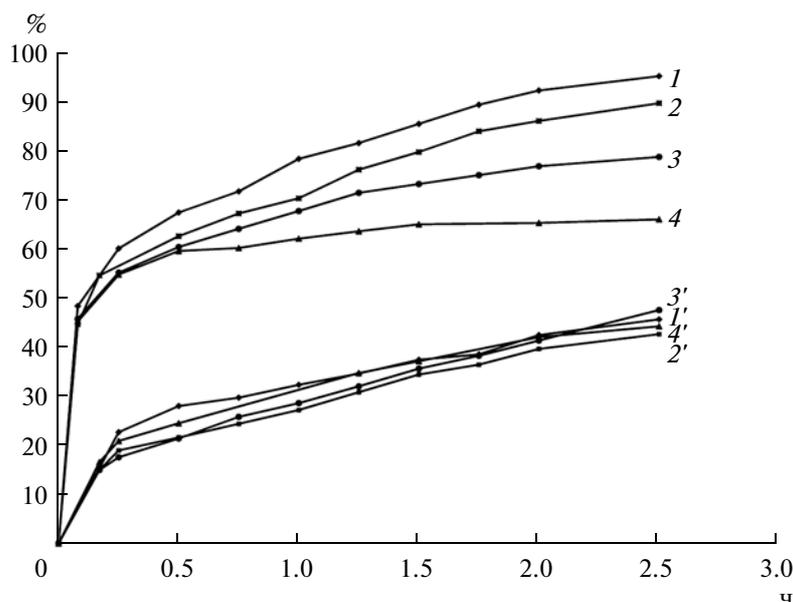


Рис. 3. Извлечение меди (1, 2, 3) и цинка (1', 2', 3') в процессе химического выщелачивания конвертерного шлака при различной начальной концентрации  $Fe^{3+}$  в выщелачивающем растворе: 1 – 10.1, 2 – 15.1, 3 – 20.6 г/л.



**Рис. 4.** Извлечение меди (1, 2, 3, 4) и цинка (1', 2', 3', 4') в процессе химического выщелачивания конвертерного шлака при различном содержании твердой фазы в суспензии: 1 – 5, 2 – 10, 3 – 20, 4 – 30%.

из главных параметров, влияющих на гидродинамическую обстановку в реакторе, является содержание твердой фазы в суспензии. С целью выяснения зависимости эффективности и интенсивности процессов химического выщелачивания цветных металлов из конвертерного шлака от гидродинамической обстановки в реакторе проведены исследования при различном содержании твердой фазы в суспензии.

Опыты проводили при ранее выбранном рН, равным 1.5, температуре 70°C и начальной концентрации трехвалентного железа в выщелачивающем растворе 15.1 г/л. В реактор добавляли твердую фазу в таком количестве, чтобы ее содержание в суспензии составляло 5, 10, 20 и 30%.

Результаты исследований представлены на рис. 4. Видно, что изменение содержания твердой фазы в диапазоне от 5 до 30% практически не влияло на извлечение цинка, тогда как извлечение меди значительно снижалось при увеличении этого параметра.

Так, за 2.5 ч процесса извлечение меди составило 89.4% при содержании твердой фазы 10% в то время как при 30% – только 60.8%. Подобная закономерность по извлечению меди в раствор в зависимости от плотности пульпы была получена также в работе [8] и может быть объяснена тем, что с увеличением количества твердой фазы в единице объема концентрация трехвалентного железа в растворе в процессе выщелачивания была меньше в каждый момент времени. Это связано с тем, что опыты были проведены в периодическом режиме при заданной начальной концентрации

трехвалентного железа в выщелачивающем растворе. При этом извлечение цинка в раствор за то же время выщелачивания менялось незначительно – от 35 до 42%.

Анализ представленных данных показывает, что увеличение содержания твердой фазы в суспензии приводит к снижению извлечения меди в раствор. Однако разница между содержанием 5 и 10% незначительна (около 5%), в то время как дальнейшее ее увеличение до 20, а особенно, до 30% резко снижало эффективность выщелачивания (извлечение меди снижалось примерно на 10 и 20% по сравнению с содержанием твердой фазы 10%).

Для создания технологии выщелачивания цветных металлов из шлаков необходимо предусмотреть замкнутый цикл водопотребления с использованием регенерированных оборотных растворов. Предполагается использовать процесс биорегенерации с использованием ацидофильных микроорганизмов – растворов после химического выщелачивания. Для исследования этого процесса необходимо знать поведение ионов железа в процессе химического выщелачивания.

Изменение концентрации ионов  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  при выщелачивании медеплавильного конвертерного шлака при различном содержании твердой фазы в суспензии при 70°C, начальной концентрации  $Fe^{3+}$  в выщелачивающем растворе 15.1 г/л представлено на рис. 5. Из данных видно, что в процессе выщелачивания снижалась концентрация ионов  $Fe^{3+}$  и увеличивалась концентрация ионов  $Fe^{2+}$ . При содержании твердой фазы больше 10% концентрация ионов железа в растворе становилась настолько вы-

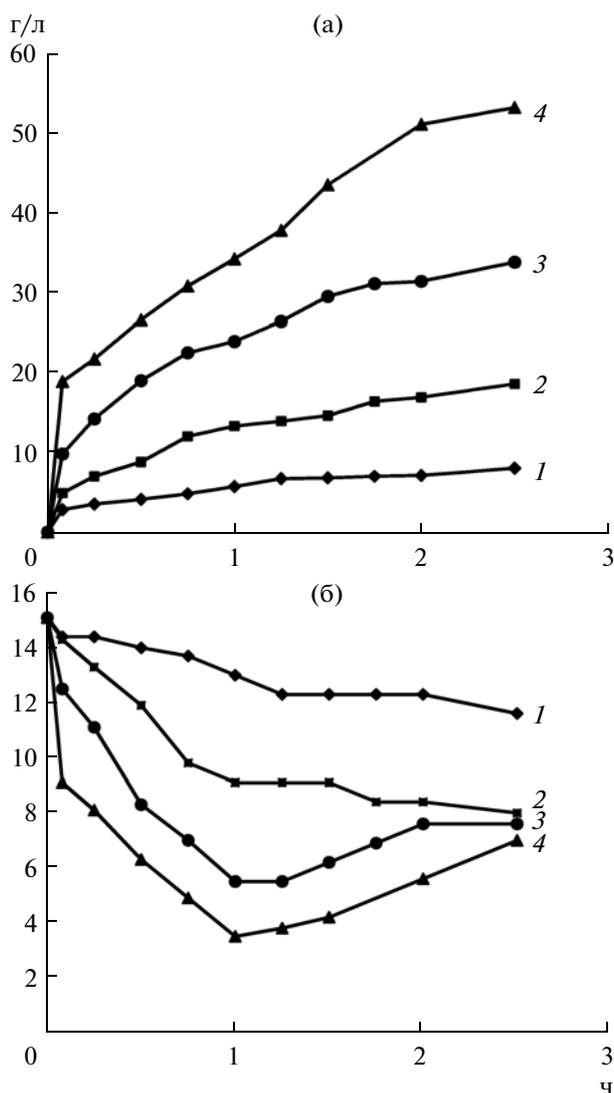
сокой, что его регенерация будет затруднительной, а концентрация ионов трехвалентного железа после регенерации — избыточной (выше 30 г/л).

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что оптимальным содержанием твердой фазы в суспензии при выщелачивании шлаков является 10%, которое обеспечивает 89.4% извлечения меди в раствор, достаточное извлечение цинка (39.3%), а также наиболее приемлемую концентрацию ионов двухвалентного железа в растворе для его регенерации (20–25 г/л).

**Биорегенерация раствора после химического выщелачивания шлака.** Полученный продуктивный раствор может быть повторно использован для выщелачивания шлаков после окисления в нем ионов двухвалентного железа. Окисление железа может быть проведено с применением железooksисляющих ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов. Регенерация ионов  $Fe^{3+}$  в продуктивном растворе проводилась созданными мезофильной и умеренно термофильной ассоциациями при 30 и 40°C соответственно. Путем многократного пересева ассоциаций на среде 9К, с постепенным увеличением концентраций цветных металлов, обе ассоциации были адаптированы к концентрации меди и цинка 5 г/л. При этом скорость окисления ионов двухвалентного железа в питательной среде составляла 0.27 г/л · ч для мезофильной и 0.21 г/л · ч для умеренно термофильной ассоциации соответственно. Полученные скорости характерны для активных железooksисляющих культур, поэтому обе ассоциации микроорганизмов были использованы в опытах по регенерации окислителя в продуктивном растворе после химического выщелачивания шлаков.

Определение кинетики окисления двухвалентного железа проводилось с использованием продуктивного раствора, полученного при наиболее эффективном химическом выщелачивании шлаков (температура — 70°C, начальной концентрации  $Fe^{3+}$  в выщелачивающем растворе 15.1 г/л, содержание твердой фазы 10%) и содержащего 2.45 г/л меди и 0.98 г/л цинка. С целью определения наличия ингибирующих компонентов проводилось сравнение скоростей окисления ионов железа в исходном и разбавленном в 2 раза средой 9К, не содержащей железа, растворах. Разбавленный раствор содержал 1.23 и 0.49 г/л меди и цинка соответственно. Окисление ионов железа умеренно термофильной ассоциацией проводилось как в автотрофных, так и в миксотрофных условиях при добавлении дрожжевого экстракта (ДЭ).

Результаты исследований по скорости окисления ионов  $Fe^{2+}$  (биорегенерация  $Fe^{3+}$ ) представлены в таблице. Как следует из данных таблицы, скорость окисления ионов железа при 30°C мезофильной ассоциацией была несколько выше в исходном продуктивном растворе по сравнению с



**Рис. 5.** Концентрации ионов  $Fe^{2+}$  (а) и  $Fe^{3+}$  (б) в процессе химического выщелачивания конвертерного шлака при различном содержании твердой фазы в суспензии: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 20, 4 — 30%.

разбавленным средой 9К в соотношении 1 : 1 и составила 0.25 и 0.20 г/л · ч соответственно. Использование умеренно термофильной ассоциации при 40°C обеспечило скорость окисления  $Fe^{2+}$  0.23 г/л · ч. Скорость окисления  $Fe^{2+}$  в растворе этой же ассоциацией с добавлением дрожжевого экстракта составила 0.25 г/л · ч, что близко к другим полученным показателям. При этом разбавление питательной средой не оказало положительного влияния на этот параметр. Это свидетельствовало о том, что в исходном продуктивном растворе не имелось ингибирующих компонентов для используемых микроорганизмов. Кроме того, все ассоциации обеспечили полное окисление ионов  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$ .

Основные характеристики биорегенерации продуктивного раствора в различных условиях

Ассоциация микроорганизмов	Условие	Концентрация, г/л			Скорость окисления ионов $Fe^{2+}$ , г/л · ч
		$Fe^{3+}$ исходная	$\Sigma Fe$ исходная	$Fe^{3+}$ конечная	
Мезофильная	Исходный раствор	11.6	23.5	20.5	0.25
	Разбавленный раствор	6.1	12.0	11.0	0.20
Умеренно термофильная	Исходный раствор	11.2	24.4	19.4	0.23
	Исходный раствор с добавлением ДЭ	11.2	24.4	20.0	0.25
	Разбавленный раствор	5.5	11.4	10.4	0.24
	Разбавленный раствор с добавлением ДЭ	5.5	11.4	10.2	0.22

Сравнение скоростей окисления  $Fe^{2+}$  обеими ассоциациями микроорганизмов показало принципиальную возможность их применения в операции регенерации продуктивного раствора для его повторного использования на стадии химического выщелачивания. При этом в процессе окисления ионов  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$  наблюдалось снижение суммарной концентрации железа из-за частичного выпадения в осадок ионов  $Fe^{3+}$  в виде ярозита (реакция 13), но цветные металлы при этом оставались в растворе.

Таким образом, показано, что предложенный способ выщелачивания цветных металлов из конвективного медеплавильного шлама с применением биогидрометаллургии позволяет извлечь практически полностью медь (~90%), частично цинк (~40%). При этом регенерация трехвалентного железа в продуктивном растворе может быть эффективно осуществлена мезофильной или умеренно термофильной ассоциациями железобактериальных микроорганизмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-288.2013.5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gorai B., Jana R., Premchand K. // Resour. Conserv. Recycl. 2003. V. 39. № 4. P. 299–313.
- Kim T.J. // Copper Smelting – An Update. Proc. Int. Symp. New York: AIME, 1981. P. 33–39.
- Rao G.V., Nayak B.D. // J. Mines. Met. Fuels. 1992. V. 40. № 3–4. P. 131–134.
- Rudnik E., Burzynska L., Gumowska W. // Miner. Eng. 2009. V. 22. № 1. P. 88–95.
- Yang Z., Rui-lin M., Wang-dong N., Hui W. // Hydrometallurgy. 2010. V. 103. № 1–4. P. 25–29.
- Banza A.N., Gock E., Kongolo K. // Hydrometallurgy. 2002. V. 67. № 1–3. P. 63–69.
- Anand S., Rao K.S., Jena P.K. // Hydrometallurgy. 1983. V. 10. № 3. P. 305–312.
- Carranza F., Romero R., Mazuelos A., Iglesias N., Forcat O. // Hydrometallurgy. 2009. V. 97. № 1–2. P. 39–45.
- Carranza F., Iglesias N., Mazuelos A., Romero R., Forcat O. // Miner. Eng. 2009. V. 22. № 1. P. 107–110.
- Anand S., Rao P., Kanta X., Jena P.K. // Hydrometallurgy. 1980. V. 5. № 4. P. 355–365.
- Altundogan H.S., Boyrazli M., Tumen F. // Miner. Eng. 2004. V. 17. № 3. P. 465–467.
- Gbor P.K., Ahmed I.B., Jia C.Q. // Hydrometallurgy. 2000. V. 57. № 1. P. 13–22.
- Ahmed I.B., Gbor P.K., Jia C.Q. // Can. J. Chem. Eng. 2000. V. 78. № 4. P. 694–703.
- Муравьев М.И., Фомченко Н.В., Кондратьева Т.Ф. // Прикл. биохимия и микробиология. 2011. Т. 47. № 6. С. 663–671.
- Фомченко Н.В., Бирюков В.В. // Прикл. биохимия и микробиология. 2009. Т. 45. № 1. С. 64–69.
- Muravyov M.I., Fomchenko N.V., Usoltsev A.V., Vasilyev E.A., Kondrat'eva T.F. // Hydrometallurgy. 2012. V. 119–120. P. 40–46.
- Silverman M.P., Lundgren D.G. // J. Bacteriol. 1959. V. 77. № 5. P. 642–647.
- Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод. М.: Недра, 1970. 140 с.
- Dutrizac J.E. // Lead-Zinc-Tin '80. Proc. Int. Symp. New York: AIME, 1980. P. 532–564.

## Leaching of Nonferrous Metals from Copper-Smelting Slag with Acidophilic Microorganisms

M. I. Muravyov and N. V. Fomchenko

*Vinogradskii Institute of Microbiology, Moscow, 117312 Russia*

*e-mail: maxmuravyov@gmail.com*

Received March 12, 2013

**Abstract**—The leaching process of copper and zinc from copper converter slag with sulphuric solutions of trivalent iron sulphate obtained using the association of acidophilic chemolithotrophic microorganisms was investigated. The best parameters of chemical leaching (temperature 70°C, an initial concentration of trivalent iron in the leaching solution of 10.1 g/L, and a solid-phase content in the suspension of 10%) were selected. Carrying out the process under these parameters resulted in the recovery of 89.4% of copper and 39.3% of zinc in the solution. The possibility of the bioregeneration of trivalent iron in the solution obtained after the chemical leaching of slag by iron-oxidizing acidophilic chemolithotrophic microorganisms without inhibiting their activity was demonstrated.