

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ТРИСУЛЬФИДА МЫШЬЯКА ИЗ ПРОМЫВНЫХ ВОД СЕРНО-КИСЛОТНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ЗАВОДОВ

© 2017 г. **С.В. Мамяченков, О.С. Анисимова, Д.А. Костина**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

*Статья поступила в редакцию 24.05.16 г., доработана и подписана в печать 13.09.16 г.*

Недостатками сульфидного метода очистки промывных вод серно-кислотного производства являются образование мелкодисперсных (размер частиц от 0,3 до 1,5 мкм) труднофильтруемых осадков сульфида мышьяка (III) и опасность выделения сероводорода в атмосферу при передозировке гидросульфида натрия. Исследован процесс коагуляции золь сульфида мышьяка для разработки более эффективной и быстрой технологии фильтрации осадка. Определены скорости фильтрации в различных режимах подачи гидросульфида натрия, рассмотрена зависимость скорости отстаивания и фильтрации от присутствия коагулянтов – сульфата железа и сульфата алюминия. Установлено, что реализация рассредоточенной подачи гидросульфида натрия при осаждении сульфида мышьяка в сочетании с применением неорганического коагулянта – сульфата железа (III) – позволит в несколько раз увеличить размеры частиц  $As_2S_3$ , а также повысить скорости фильтрации и отстаивания пульп.

**Ключевые слова:** сульфид мышьяка, коагуляция, скорость фильтрации, сульфат железа, сульфат алюминия.

**Мамяченков С.В.** – докт. техн. наук, профессор кафедры металлургии тяжелых цветных металлов УрФУ (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: svmamachenkov@yandex.ru.

**Анисимова О.С.** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры УрФУ. E-mail: osanis@mail.ru.

**Костина Д.А.** – студентка той же кафедры УрФУ. E-mail: dar.kostina@yandex.ru.

**Для цитирования:** Мамяченков С.В., Анисимова О.С., Костина Д.А. Совершенствование процесса осаждения трисульфида мышьяка из промывных вод серно-кислотного производства медеплавильных заводов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 2. С. 36–42. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-36-42.

*Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S., Kostina D.A.*

### Improvement of arsenic trisulfide precipitation from sulfuric acid production flush waters at copper works

The sulfide method for purification of sulfuric acid production flush waters have such disadvantages as the formation of finely dispersed (0,3 to 1,5  $\mu\text{m}$  particle size) difficult-to-filter precipitates of arsenic sulfide (III) and the risk of hydrogen sulfide release into the atmosphere in case of sodium hydrosulfide overdose. The article studies the process of arsenic sulfide sols coagulation in order to develop a more effective and fast precipitate filtration technology. The article determines filtering rates in various modes of sodium hydrosulfide feeding, and dependence of the settling and filtering rates on the presence of coagulants – iron sulfate and aluminum sulfate. It was found that the implementation of dispersed feeding of sodium hydrosulfide during the arsenic sulfide precipitation in combination with the use of inorganic coagulant – ferric sulfate (III) would make it possible to increase the size of  $As_2S_3$  particles by several times, and to increase filtering and settling rates of pulps.

**Keywords:** arsenic sulfide, coagulation, filtering rate, ferric sulfate, aluminum sulfate.

**Mamyachenkov S.V.** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of metallurgy of heavy non-ferrous metals of Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: svmamachenkov@yandex.ru.

**Anisimova O.S.** – Cand. Sci. (Eng.), Associate professor of the same Department. E-mail: osanis@mail.ru.

**Kostina D.A.** – Student of the same Department. E-mail: dar.kostina@yandex.ru.

**Citation:** Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S., Kostina D.A. Sovershenstvovanie protsesssa osazhdeniya trisul'fida mysh'yaka iz promyvnykh vod serno-kislotnogo proizvodstva medeplavil'nykh zavodov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 2. P. 36–42. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-36-42.

## Введение

В процессах плавки медных концентратов мышьяк переходит в штейн не более чем на 1–2 %, в шлак – 1,5–5,0 %, в пыли – до 16–20 %, и около 77–80 % As удаляется с газами, при промывке которых в схеме серно-кислотного производства он концентрируется в кислых промыв-

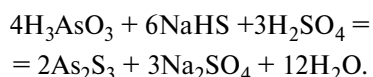
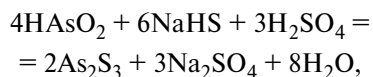
ных растворах (стоках), требующих утилизации [1–5].

В связи с увеличением количества перерабатываемых медеплавильными предприятиями высокомышьяковистых медных концентратов крайне актуальной становится задача увеличения производительности участков очистки промывных вод от мышьяка при сохранении объема существующего оборудования.

При очистке растворов серно-кислотного производства, содержащих до 10–15 г/дм<sup>3</sup> мышьяка в форме высокотоксичных соединений (HAsO<sub>2</sub> и H<sub>3</sub>AsO<sub>3</sub>), зачастую применяют осаждение в виде труднорастворимого сульфида. Этот способ имеет ряд преимуществ перед другими методами (очистка солями 3-валентного железа, соединениями кальция, а также пиролюзитные технологии и др.) [6–11]. Во-первых, используемые сульфидные реагенты способны достаточно полно (до 99 %) и безопасно выделять мышьяк из растворов в виде осадков, пригодных для длительного хранения, во-вторых, используемые реагенты относительно доступны и недороги.

Недостатками сульфидного метода очистки промывных вод серно-кислотного производства являются образование мелкодисперсных (размер частиц от 0,3 до 1,5 мкм) труднофильтруемых осадков сульфида мышьяка (III), а также опасность выделения сероводорода в атмосферу при передозировке гидросульфида натрия. Причины образования зелей As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> подробно рассмотрены в работах [12–15], однако полученные в них данные зачастую противоречивы и не позволяют дать объективные технологические рекомендации.

Сама технология получения труднорастворимого сульфида мышьяка заключается во введении в раствор гидросульфида натрия по реакциям:



В составе частиц золя As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, получающегося в результате взаимодействия As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (HAsO<sub>2</sub>) и NaHS всегда присутствуют небольшие количества H<sub>2</sub>S в виде As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>S.

При ведении процесса в неоптимальном гидродинамическом режиме имеется возможность широкого изменения содержания H<sub>2</sub>S в коллоидной частице. Небольшое количество стабилизатора в

мицелле называют активной частью, и ее присутствием объясняется поведение золя при введении в него электролитов [16–20].

Мицелла состоит из сравнительно инертного ядра и способной к ионизации активной части (ионогенного комплекса). Этот комплекс можно рассматривать как настоящее комплексное соединение, и строение мицеллы золя сульфида мышьяка можно изобразить следующей схемой: xAs<sub>2</sub>S<sub>3</sub>:yAs<sub>2</sub>S<sub>4</sub>H<sup>-</sup>·yH<sup>+</sup>.

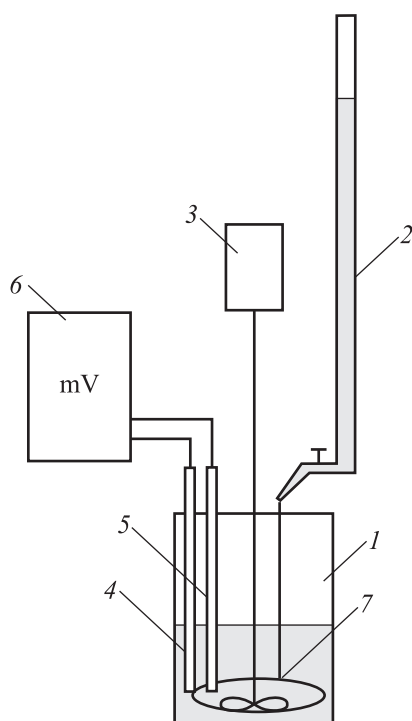
Такое строение объясняет как заряд частиц золя сульфида мышьяка, так и поведение золя при введении в него электролитов, однако не иллюстрирует, каким образом обеспечивается связь между ионогенным комплексом и неактивной частью мицеллы. Эта схема не может объяснить и того, почему коллоидные частицы характеризуются как общим скачком потенциала на границе двух фаз, так и особым потенциалом, обнаруживающимся только при электрокинетических явлениях. Коагулирующим действием в электролите обладают не все его ионы, а только те, которые несут заряд, одноименный с зарядом противоиона мицеллы (или, что то же, заряд, противоположный по знаку заряду коллоидной частицы). Таким образом, для зелей сульфида мышьяка с отрицательно заряженными частицами коагулирующими ионами являются катионы. С технологической точки зрения для коагуляции золя сульфида мышьяка могут быть успешно применены сульфаты алюминия и железа (III).

Целью данной работы является поиск решения задачи повышения производительности процессов отстаивания и фильтрации осадков трисульфида мышьяка при очистке промывных вод серно-кислотных производств медеплавильных предприятий.

## Методика экспериментов

Эксперименты проводили в лабораторных условиях на специально подготовленной установке, схема которой представлена на рис. 1.

В реакционный стакан с рабочим раствором подавали гидросульфид натрия через дозатор, к которому крепили специальную кольцевую трубку с отверстиями (35 отверстий Ø0,5 мм), помещенную на дно реакционного стакана. Такая установка позволяет производить рассредоточенную подачу сульфидного реагента в зону турбулентного перемешивания раствора снизу вверх, что исклю-



**Рис. 1.** Принципиальная схема лабораторной установки  
 1 – реакционный стакан; 2 – дозатор для подачи раствора NaHS;  
 3 – верхняя мешалка; 4 – платиновый электрод;  
 5 – хлорсеребряный электрод сравнения; 6 – милливольтметр;  
 7 – кольцо с отверстиями для подачи NaHS

чае возникает возникновение локальных зон пересыщения гидросульфидом, а значит, и нежелательное выделение токсичного сероводорода. Для сравнения определяли скорость отстаивания пульпы при капельном режиме подачи реагента сверху.

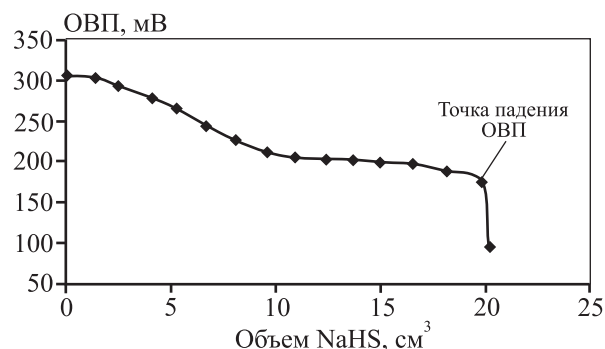
В качестве рабочих растворов в работе использовали промывные сточные воды серно-кислотного цеха медеплавильного завода, содержащие, г/дм<sup>3</sup>:

- раствор 1 – 9,85 As и 32,8 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;
- раствор 2 – 4,5 As и 35,0 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Показателем окончания реакции служило резкое снижение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) (рис. 2). Изменение ОВП системы измеряли с помощью платинового рабочего (ЭПВ-1) и хлорсеребряного электрода сравнения (ЭВЛ-1М3) на милливольтметре рН-410.

Из полученной пульпы отбирали пробы трисульфида мышьяка (0,3 мл) и анализировали крупность получаемых частиц в растворе с помощью микроскопа Planachromat HD с приставкой Levenhuc C310 при увеличении до 200<sup>x</sup>.

Пульпу помещали в мерный цилиндр и в течение 3 ч измеряли скорости отстаивания и фильтрации по известным методикам [21, 22].



**Рис. 2.** Характерная кривая изменения ОВП в процессе осаждения сульфида мышьяка

Аналогичные операции проводили при добавлении в исходный раствор коагулянтов. В качестве присадок-электролитов использовали следующие реагенты:

- добавка 1 – Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O;
- добавка 2 – Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O.

Скорость перемешивания во всех опытах поддерживали постоянной для обеспечения турбулентного режима в пределах чисел Рейнольдса Re = 3000÷4000.

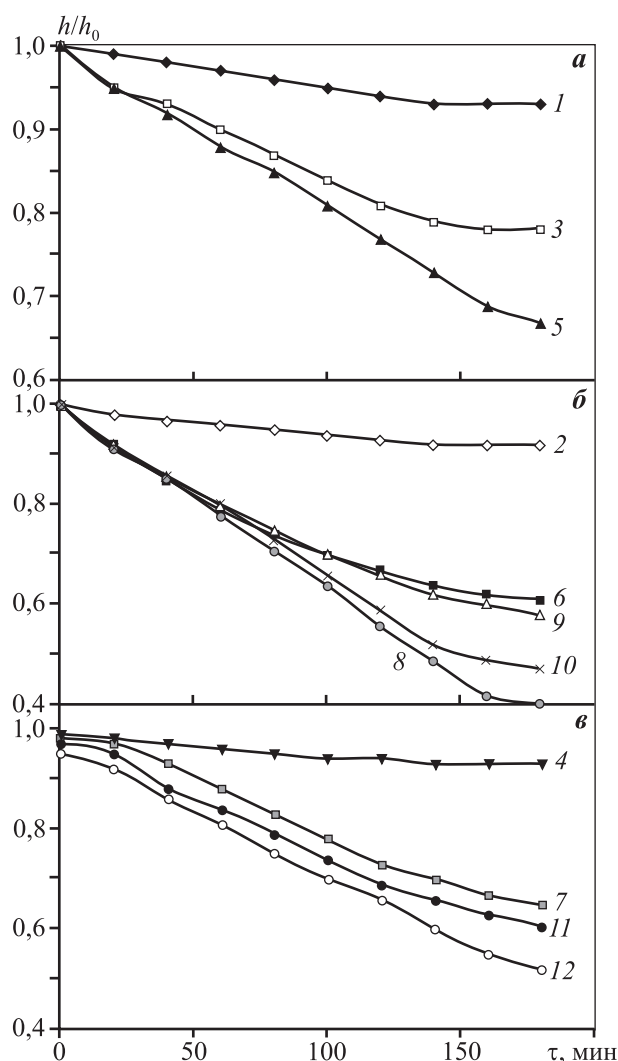
## Результаты и их обсуждение

В ходе работы были проведены опыты (см. таблицу), в которых отработывались дозировка реагентов, способ подачи гидросульфида натрия (капельный и рассредоточенный по объему) и вли-

### Условия опытов по осаждению трисульфида мышьяка

№ опыта	Раствор*	Рассредоточенная подача	Коагулянт	Количество коагулянта, г
1	1	Нет	–	–
2	1	Нет	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,02
3	1	Да	–	–
4	1	Да	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,02
5	2	Нет	–	–
6	2	Нет	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,03
7	2	Нет	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,03
8	2	Да	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,03
9	2	Да	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,01
10	2	Да	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,02
11	2	Да	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,01
12	2	Да	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,02

\* Раствор 1 – 9,85 As и 32,8 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 2 – 4,5 As и 35,0 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

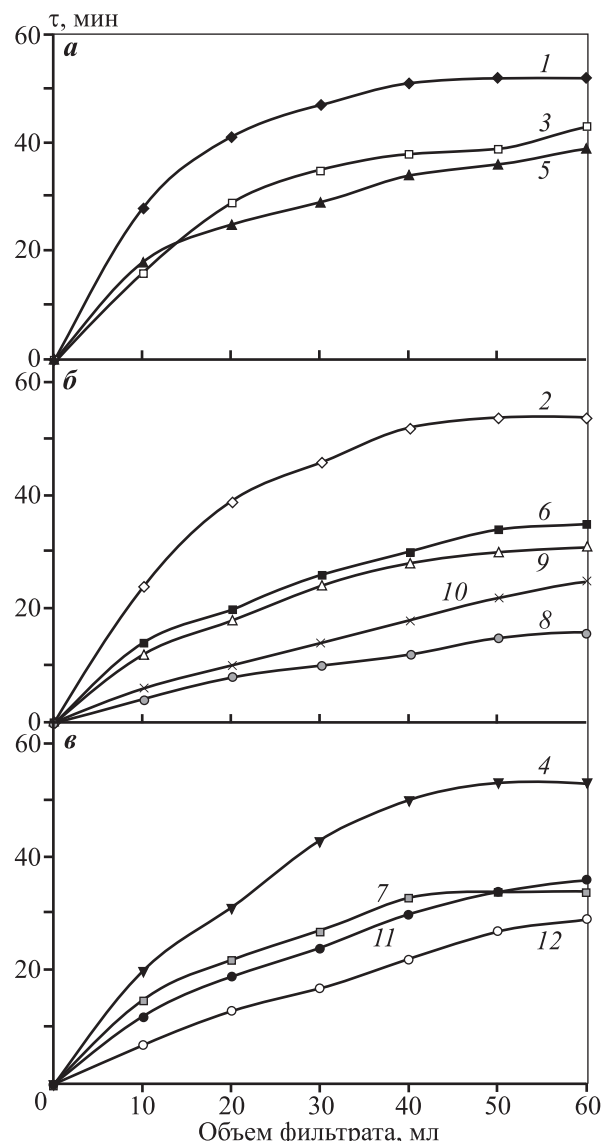


**Рис. 3.** Скорость осаждения сульфида мышьяка, полученного в различных условиях  
*а* – без добавок, *б* – с добавкой  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , *в* – с  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$   
 Цифры у кривых соответствуют № опыта (см. таблицу)

яние исходной концентрации мышьяка в очищаемом растворе на свойства получаемого сульфидного осадка.

На рис. 3 представлены результаты измерения скорости отстаивания пульп сульфида мышьяка (отношение высоты неосветленной части раствора к высоте исходной пульпы —  $h/h_0$ ), а на рис. 4 — скорости фильтрации тех же пульп в виде зависимости количества накопленного в цилиндре фильтрата от времени.

В ходе исследований выяснилось, что для растворов с концентрацией мышьяка 9–10 г/дм<sup>3</sup> (опыты 1–4, см. таблицу), в том числе при реализации рассредоточенной подачи реагента, невозможно достичь приемлемых скоростей отстаивания и

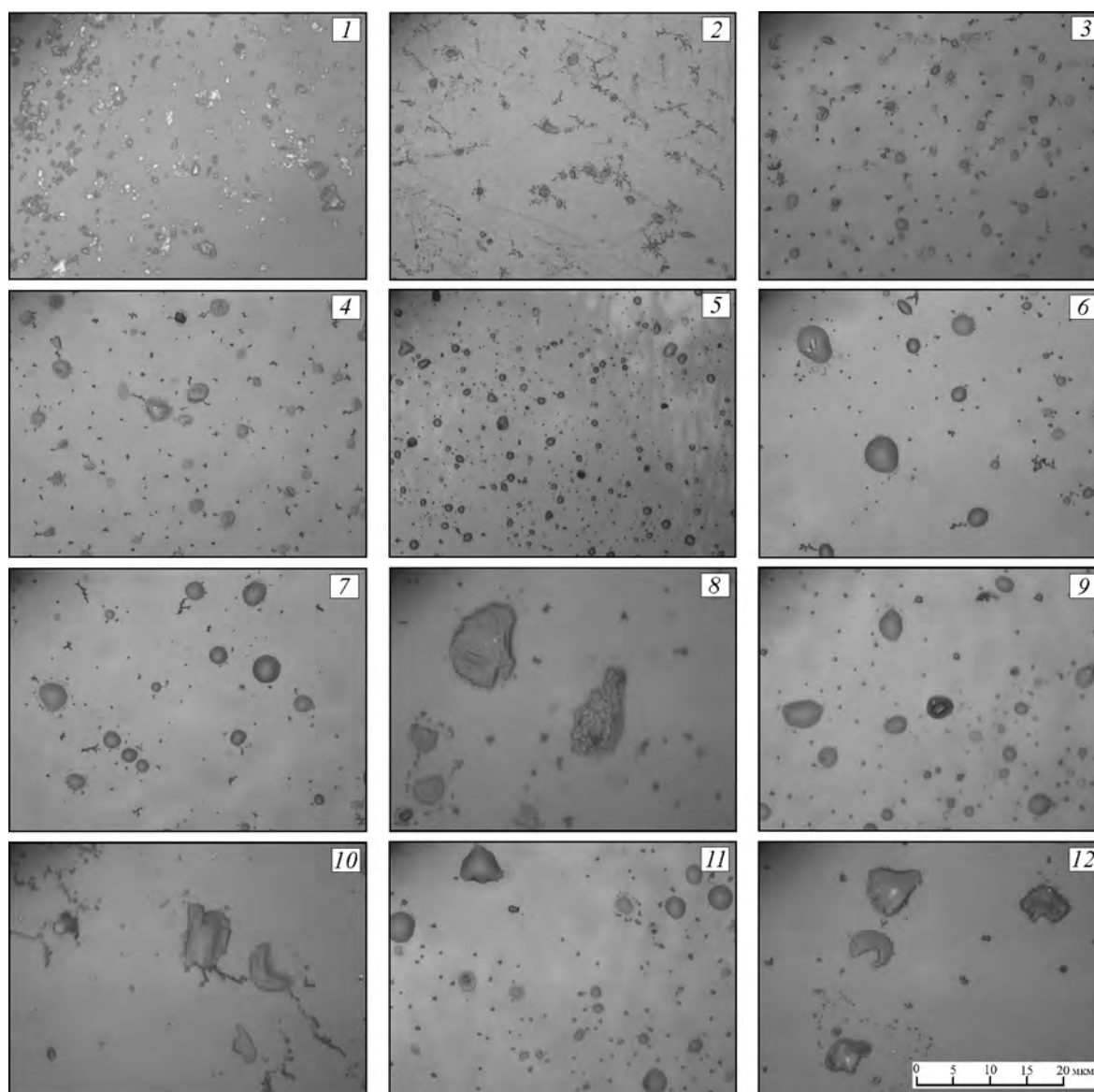


**Рис. 4.** Скорость фильтрации сульфида мышьяка, полученного в различных условиях  
*а* – без добавок, *б* – с добавкой  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , *в* – с  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$   
 Цифры у кривых соответствуют № опыта (см. таблицу)

фильтрации получаемого сульфида мышьяка. Даже при выдержке пульпы в течение 4 сут величина  $h/h_0$  не превышала 0,6–0,65 (см. рис. 3).

Скорость отстаивания при капельном режиме (т.е. подача сверху, а не снизу через кольцо на дне) не превышает 0,93 (см. рис. 3, *а*, кр. 1) и заметно не увеличивается при подаче в раствор в качестве коагулянта сульфата железа (III). Скорости фильтрации таких пульп тоже крайне низки — не более 0,4–0,6 мл/мин (см. рис. 4).

Полученные осадки (рис. 5, фото 1 и 3) имеют очень мелкодисперсную зольную структуру, состоящую из конгломератов мицелл неправильной



**Рис. 5.** Микрофотографии осадка сульфида мышьяка  
1–12 соответствуют условиям опытов, приведенным в таблице

формы размером до 0,3 мкм. Большую часть осадка составляют частицы менее 0,03 мкм. Добавки неорганических коагулянтов несколько укрупняют частицы и упорядочивают их форму (рис. 5, фото 2 и 4), однако в таких условиях действия обоих коагулянтов, очевидно, недостаточно для заметной нейтрализации заряда частиц и их слипания в крупные устойчивые конгломераты.

При рассредоточенной подаче гидросульфида натрия в объем раствора для осаждения сульфида мышьяка из раствора 1 скорости отстаивания (см. рис. 3, кр. 3 и 4) и фильтрации (рис. 4, кр. 3 и 4) пульпы значительно увеличиваются, что говорит о том, что этот прием является эффективным

для формирования более крупных осадков  $As_2S_3$ . Получены близкие к сфероидальным образования крупностью 2–3 мкм (см. рис. 5, фото 3 и 4), однако доля очень мелких частиц все еще велика.

Для раствора с концентрацией мышьяка 4,5 г/л капельная подача гидросульфида также приводит к появлению достаточно мелких частиц, не образующих заметных конгломератов (рис. 5, фото 5), однако введение неорганических коагулянтов, особенно в концентрациях до 30 мг/л, способствует формированию достаточно крупнокристаллического (4–6 мкм) осадка (рис. 5, фото 6 и 7), но в пульпе сульфида мышьяка значительную долю составляют и мелкодисперсные частицы.

Скорости фильтрации осадков при капельном осаждении  $As_2S_3$  из раствора 2 составляют около 1,3–1,5 мл/мин, показатель скорости отстаивания  $h/h_0 = 63 \div 65$ . Рассредоточенная подача реагентов (см. таблицу, опыты 8–12) в значительной степени увеличивает скорости как осаждения, так и фильтрации. При добавке сульфата железа (III) в количестве 30 мг/л (опыт 8) получены наиболее крупные устойчивые конгломераты осадка сульфида мышьяка, а частицы размером менее 1 мкм отсутствуют (рис. 5, фото 8). Скорости осаждения ( $h/h_0$ ) и фильтрации составляют соответственно 0,4 и 4,0–4,5 мл/мин и являются максимальными для всех проведенных серий опытов.

При исследовании влияния расхода коагулянтов (сульфатов железа и алюминия) заметной разницы в их воздействии на скорости осаждения и фильтрации не выявлено (кр. 9–12 на рис. 3 и 4). При концентрациях добавок 20 мг/л получаются более крупные конгломераты  $As_2S_3$  (см. рис. 5, фото 10 и 12) даже в режиме более быстрой подачи реагента, чем при введении 10 мг/л (рис. 5, фото 9 и 11).

## Выводы

1. Проведенные лабораторные исследования позволяют сделать вывод о том, что технологические и конструкционные мероприятия по получению легкофильтруемых осадков сульфида мышьяка могут значительно увеличить производительность фильтровального оборудования участка.

2. Наиболее значимым мероприятием для получения легкофильтруемых осадков считаем организацию рассредоточенной подачи гидросульфида натрия в зону наивысшей турбулентности реактора для осаждения сульфида мышьяка. Реализация такой подачи в сочетании с применением неорганических коагулянтов позволит увеличить:

- размеры частиц  $As_2S_3$  в 5–8 раз;
- скорость фильтрации в 3–4 раза;
- скорость отстаивания пульпы в 4–5 раз.

Это позволит обеспечить работу сгустителя в штатном режиме и значительно снизить нагрузку на фильтр-пресс.

3. Применение в качестве коагулянта  $Fe_2(SO_4)_3$  позволит получать более крупные частицы сульфида мышьяка, чем без использования добавки. Эффективность введения коагулянта в количестве около 2 мг/л значительно увеличится при организации отдельного сгущения пульпы перед фильтрацией. Применение сульфата алюминия

$Al_2(SO_4)_3$  в качестве реагента нецелесообразно по экономическим соображениям, поскольку его влияние на процесс коагуляции практически не отличается от влияния сульфата железа.

## Литература

1. *Набойченко С.С., Мамяченков С.В., Карелов С.В.* Мышьяк в цветной металлургии. Екатеринбург: УРО РАН, 2004.
2. *Piret N.L.* The removal and safe disposal of arsenic in copper processing // JOM: J. Miner., Met. Mater. Soc. 1999. Vol. 51. No. 9. P. 16–17.
3. *Wang H.J., Gong W.X., Liu R.P., Liu H.J., Qu J.H.* Treatment of high arsenic content wastewater by a combined physical–chemical process // Colloid. Surf. 2011. Vol. 379. P. 116–120.
4. *Dalewski F.* Removing arsenic from copper smelter gases // JOM: J. Miner., Met. Mater. Soc. 1999. Vol. 51. No 9. P. 24–26.
5. *Virčikova E., Palfy P., Molnar L., Lech P.* As(III) elimination from solutions and As-precipitates characteristic // Miner. Slov. 1996. Vol. 28. No 5. P. 406–408.
6. *Шубинок А.В.* О выводе мышьяка (III) из растворов мокрой очистки газов // Комплексное использование минерального сырья. 1992. No. 5. С. 59–63.
7. *Mondal P., Majumder C.B., Mohanty B.* Laboratory based approaches for arsenic remediation from contaminated water: recent developments // J. Hazard. Mater. 2006. Vol. 137. P. 464–479.
8. *Bothe J.V., Brown P.W.* Arsenic immobilization by calcium arsenate formation // Environ. Sci. Technol. 1999. Vol. 33. P. 3806–3811.
9. *Исабаев С.М., Пашилкин А.С., Мильке Э.Г., Жамбеков М.И.* Физико-химические основы сульфидирования мышьяксодержащих соединений. Алма-Ата: Наука, 1986.
10. *Meltem B.B., Aysegul P.* Determination of arsenic removal efficiency by ferric ions using response surface methodology // J. Hazard. Mater. 2009. Vol. 166. P. 796–801.
11. *Papassiopi N., Virčikova E., Nenov V., Kontopoulos A.* Removal and fixation of arsenic in the form of ferric arsenates. Three parallel experimental studies // Hydrometallurgy. 1996. Vol. 41. P. 241–253.
12. *Li Guo, Yaguang Du, Qiushi Yi, Dunshun Li, Longwen Cao, Dongyun Du.* Efficient removal of arsenic from «dirty acid» wastewater by using a novel immersed multi-start distributor for sulphide feeding // Separat. Purific. Technol. 2015. Vol. 142. P. 209–214.
13. *Lewis A., Hille R.P.* An exploration into the sulphide precipitation method and its effect on metal sulphide removal // Hydrometallurgy. 2006. Vol. 81. P. 197–204.

14. Lewis A.E. Review of metal sulphide precipitation // *Hydrometallurgy*. 2010. Vol. 104. P. 222–234.
15. Raman G., Gnanam F.D., Ramasamy P. Gel grown single crystals of arsenic trisulphide // *J. Crystal Growth*. 1986. Vol. 75. No. 3. P. 471–472.
16. Mokone T.P., Hille R.P., Lewis A.E. Effect of solution chemistry on particle characteristics during metal sulfide precipitation // *J. Colloid. Int. Sci.* 2010. Vol. 351. P. 10–18.
17. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. СПб.: Лань, 2010.
18. Junhao Jiang, Jinke Gong, Weiqiang Liu, Tao Chen, Chao Zhong. Analysis on filtration characteristic of wall-flow filter for ash deposition in cake // *J. Aerosol. Sci.* 2016. Vol. 95. P. 73–83.
19. Ma Wei, Ma Wenji, Ma Rongjun. Arsenic removal by sulfidation sedimentation in magnetic field // *Trans. Nonferr. Met. Soc.* 1998. Vol. 8. No. 3. P. 529–532.
20. Shalabh S., Qiankun W., Dimitrios F., Demopoulos G.P. Acidity, valency and third-ion effects on the precipitation of scorodite from mixed sulfate solutions under atmospheric-pressure conditions // *Metall. Mater. Trans.* 2006. Vol. 37. No. 2. P. 189–198.
21. Белоглазов И.Н., Голубев В.О. Основы расчета фильтрационных процессов. М.: Руда и металлы, 2002.
22. Javorskyj I., Leškow J., Kravets I., Isayev I., Gajecka E. Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Pt 1: Coherent and component methods and their generalization // *Signal Process.* 2012. Vol. 92. No. 7. P. 1559–1566.
8. Bothe J.V., Brown P.W. Arsenic immobilization by calcium arsenate formation. *Environ. Sci. Technol.* 1999. Vol. 33. P. 3806–3811.
9. Isabaev S.M., Pashinkin A.S., Mil'ke E.G., Zhambekov M.I. Fiziko-khimicheskie osnovy sul'firovaniya mysh'yak-soderzhashchikh soedinenii [Physical and chemical bases sulphidation arsenic compounds]. Alma-Ata: Nauka, 1986.
10. Meltem B.B., Aysegul P. Determination of arsenic removal efficiency by ferric ions using response surface methodology. *J. Hazard. Mater.* 2009. Vol. 166. P. 796–801.
11. Papassiopi N., Virefkova E., Nenov V., Kontopoulos A. Removal and fixation of arsenic in the form of ferric arsenates. Three parallel experimental studies. *Hydrometallurgy*. 1996. Vol. 41. P. 241–253.
12. Li Guo, Yaguang Du, Qiushi Yi, Dunshun Li, Longwen Cao, Dongyun Du. Efficient removal of arsenic from «dirty acid» wastewater by using a novel immersed multi-start distributor for sulphide feeding. *Separat. Purificat. Technol.* 2015. Vol. 142. P. 209–214.
13. Lewis A., Hille R.P. An exploration into the sulphide precipitation method and its effect on metal sulphide removal. *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 81. P. 197–204.
14. Lewis A.E. Review of metal sulphide precipitation. *Hydrometallurgy*. 2010. Vol. 104. P. 222–234.
15. Raman G., Gnanam F.D., Ramasamy P. Gel grown single crystals of arsenic trisulphide. *J. Crystal Growth*. 1986. Vol. 75. No. 3. P. 471–472.
16. Mokone T.P., Hille R.P., Lewis A.E. Effect of solution chemistry on particle characteristics during metal sulfide precipitation. *J. Colloid. Int. Sci.* 2010. Vol. 351. P. 10–18.
17. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии [Colloid chemistry]. СПб.: Лань, 2010.
18. Junhao Jiang, Jinke Gong, Weiqiang Liu, Tao Chen, Chao Zhong. Analysis on filtration characteristic of wall-flow filter for ash deposition in cake. *J. Aerosol. Sci.* 2016. Vol. 95. P. 73–83.
19. Ma Wei, Ma Wenji, Ma Rongjun. Arsenic removal by sulfidation sedimentation in magnetic field. *Trans. Nonferr. Met. Soc.* 1998. Vol. 8. No. 3. P. 529–532.
20. Shalabh S., Qiankun W., Dimitrios F., Demopoulos G.P. Acidity, valency and third-ion effects on the precipitation of scorodite from mixed sulfate solutions under atmospheric-pressure conditions. *Metall. Mater. Trans.* 2006. Vol. 37. No. 2. P. 189–198.
21. Белоглазов И.Н., Голубев В.О. Основы расчета фильтрационных процессов [Bases for design of filtration processes]. Moscow: Руда и металлы, 2002.
22. Javorskyj I., Leškow J., Kravets I., Isayev I., Gajecka E. Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Pt 1: Coherent and component methods and their generalization. *Signal Process.* 2012. Vol. 92. No. 7. P. 1559–1566.

## References

1. Naboichenko S.S., Mamyachenkov S.V., Karelov S.V. Mysh'yak v tsvetnoi metallurgii [Arsenic in non-ferrous metallurgy]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2004.
2. Piret N.L. The removal and safe disposal of arsenic in copper processing. *JOM: J. Miner., Met. Mater. Soc.* 1999. Vol. 51. No. 9. P. 16–17.
3. Wang H.J., Gong W.X., Liu R.P., Liu H.J., Qu J.H. Treatment of high arsenic content wastewater by a combined physical–chemical process. *Colloid. Surf.* 2011. Vol. 379. P. 116–120.
4. Dalewski F. Removing arsenic from copper smelter gases. *JOM: J. Miner., Met. Mater. Soc.* 1999. Vol. 51. No. 9. P. 24–26.
5. Vircikova E., Palfy P., Molnar L., Lech P. As(III) elimination from solutions and As-precipitates characteristic. *Miner. Slov.* 1996. Vol. 28. No. 5. P. 406–408.
6. Shubinok A.V. O vyvode mysh'yaka (III) iz rastvorov mokroi ochistki gazov [Derivation of arsenic (III) from solutions of wet scrubbing]. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 1992. No. 5. P. 59–63.
7. Mondal P., Majumder C.B., Mohanty B. Laboratory based approaches for arsenic remediation from contaminated