

ОСАЖДЕНИЕ МЫШЬЯКА НА ОТХОДАХ ЗОЛОТОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Каримов К.А.¹, Третьяк М.А.¹, Рогожников Д.А.¹

¹ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет имени Первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,

Научная лаборатория перспективных технологий комплексной переработки минерального и техногенного сырья цветных и черных металлов, г. Екатеринбург, Россия

kirill_karimov07@mail.ru

Необходимость увеличения объемов производства цветных металлов в условиях снижения запасов богатых полезных ископаемых заставляет промышленные предприятия вовлекать в технологический процесс различные первичные и техногенные низкосортные полиметаллические материалы, промпродукты обогащения и т.д. Общее снижение качества минерального сырья в совокупности с необходимостью вовлечения в переработку мышьяксо-держающих руд приводит к образованию больших объемов различных полупродуктов, содержащих этот высокотоксичный элемент [1].

Большое количество мышьяксо-держающих отходов образуется при переработке упорных золотосодержащих концентратов, где мышьяк находится в форме арсенопирита, скородита, теннантита и др. В процессе автоклавного окислительного выщелачивания данных материалов образуются арсенаты железа ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeAsO}_4 \cdot 0,68-0,77\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{AsO}_4)_x(\text{SO}_4)_y(\text{OH})_z \cdot w\text{H}_2\text{O}$, где $0,36 \leq x \leq 0,69$, $0,19 \leq y \leq 0,5$, $0,55 \leq z \leq 0,8$ and $0,2 \leq w \leq 0,45$ [2,3]. В процессе кондиционирования данных кеков для последующего извлечения золота образуются растворы, содержащие Fe (III) и As(V).

Быстрая нейтрализация растворов известью – это один из самых простых способов осаждения As (III) и As (V) в виде арсенитов и арсенатов железа и кальция при $\text{pH} = 3-4$. Полная очистка растворов от мышьяка достигается при мольном отношении $\text{Fe}/\text{As} \geq 3$ [4]. Совместное осаждение Fe (III) и As(V) в данных условиях происходит в форме ферригидрида, аморфных арсенатов железа плохо окристаллизованного скородита. Данные соединения со временем при длительном хранении и воздействии окружающей среды преобразуются в альфа-гетит ($\alpha\text{-FeOOH}$), что приводит к переходу мышьяка в жидкую фазу [5]. Учитывая высокую экологическую опасность мышьяка, необходимо переводить его в форму слабо-растворимых малотоксичных соединений. Скородит ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) является наименее растворимым и наиболее устойчивой формой мышьяка, что важно для его захоронения [6,7].

При производстве цветных металлов из мышьяксо-держающих концентратов и вторичного сырья часто образуются растворы без железа, но содержащие значительное количество мышьяка. Аморфные гипсовые осадки содержащие ферригидриды, гидроксиды железа,

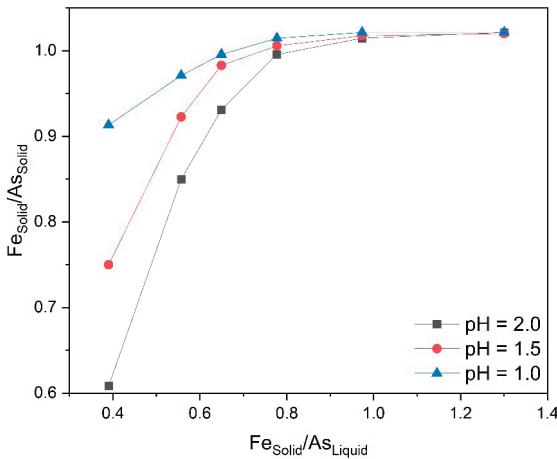
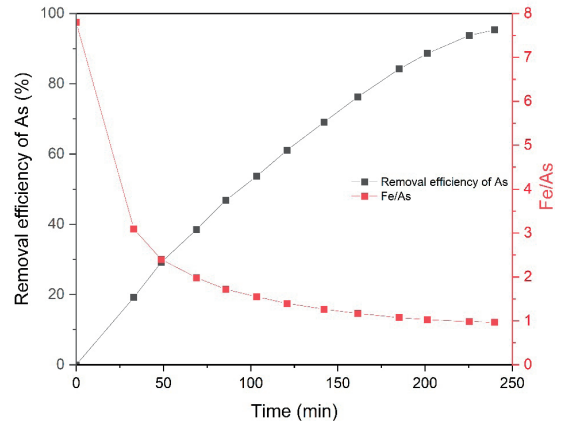
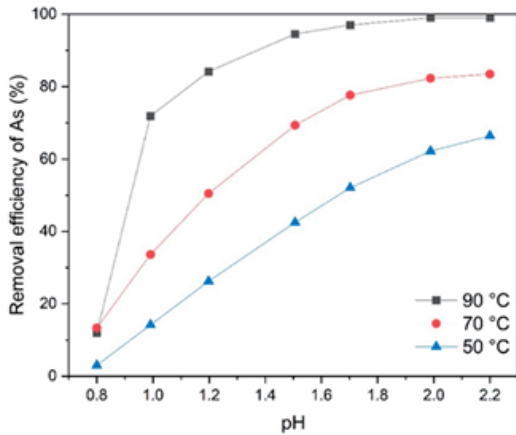


Рисунок 1 – Зависимость степени осаждения мышьяка (V) из раствора от температуры и pH

Рисунок 2 – Зависимость степени осаждения мышьяка (V) из раствора и мольного отношения Fe/As в кеке от продолжительности

Рисунок 3 – Зависимость мольного отношения Fe_{Solid}/As_{Solid} в кеке после осаждения от начального мольного отношения железа в кеке к мышьяку в растворе Fe_{Solid}/As_{Liquid}

арсенаты железа с мольным отношением в кеке $Fe/As > 1$ могут выступать в качестве источника железа для осаждения мышьяка и получения скородита.

Для осаждения мышьяка использовали аморфный железосодержащий гипсовый кек одного из золотодобывающих предприятий, работающего по технологии автоклавной переработки сульфидных пирит арсенопиритных концентратов. Кек получен на стадии очистки раствора кондиционирования автоклавного остатка от мышьяка (V) и железа (III) методом нейтрализации известником при $pH = 3-4$. Химический состав материала, %: 16,7 S; 12,1 Fe; 23,5 Ca, 1,0 C; 2,1 As. Мольное отношение в исходном материале $Fe/As = 7,8$, в скородите или арсенате железа это отношение

составляет 1, а значит данный материал может выступать в качестве источника железа для осаждения мышьяка. Основной фазой в материале является гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Небольшие пики параскородита ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$) говорят о преобладании аморфных арсенатов железа.

pH раствора является одним из ключевых параметров, влияющих на образование скородита. Поэтому исследовали диапазон изменения $pH = 0,8 - 2,2$ для оценки влияния pH процесса на осаждение мышьяка (V) из раствора. Поскольку влияние pH на эффективность осаждения может снижаться при большом избытке добавляемого железа, то использовали начальное мольное отношение железа в кеке к мышьяку в рас-

творе $Fe/As = 1.0$. Температуру процесса поддерживали 90, 70 и 50 °С, продолжительность ограничивали 240 мин.

В начале процесса осаждения рН раствора повышался, что может быть связано с взаимодействием остатков кальция с серной кислотой. Для поддержания рН на необходимом уровне использовали серную кислоту разбавленную 1:1. Результаты показали, что при $pH = 0,8$ степень осаждения мышьяка (V) не превышала 13 %, а железо, содержащееся в гипсовом кеке, растворялось на 85 % даже при температуре 90 °С (Рисунок 1).

Увеличение рН до 1 способствует резкому увеличению степени удаления мышьяка из раствора. Осаждение мышьяка при $pH = 1$ и 50, 70, 90 °С составило 14,7 %, 33,6 %, 71,9 %, соответственно. Максимальная эффективность очистки раствора достигалась в диапазоне $pH = 2,0 - 2,2$ и при 50, 70, 90 °С составила 66,4 %, 83,5 %, 99,1 %, соответственно. Оптимальными параметрами осаждения являются $pH = 1,5$ и температура 90 °С, вместе с тем в осадок переходит 95,3 % мышьяка.

Предыдущие исследования показали, что при значении $pH \leq 1,5$ процесс превращения водородного арсената железа в скородит ускоряется [8]. Однако при низком $pH \leq 1,0$ могут образовываться фазы $Fe(H_2AsO_4)_3 \cdot 5,5H_2O$ (kaatialaite) и $FeH_3(AsO_4)_2 \cdot 10H_2O$ (kamarizaite) [9], которые обладают меньшей стабильностью, чем скородит, что приводит к переходу мышьяка в раствор при контакте с водой.

Изучение влияния продолжительности на осаждение мышьяка (V) и мольное отношение Fe/As в кеке исследовали при температуре 90 °С, $pH = 1,5$. Для нивелирования влияния большого избытка добавляемого железа использо-

вали начальное мольное отношение железа в кеке к мышьяку в растворе $Fe/As = 1,0$. Зависимость степени осаждения мышьяка (V) из раствора и мольного отношения Fe/As в кеке от продолжительности представлена на рисунке 2.

Согласно представленному графику на рисунке 4, степень осаждения мышьяка плавно возрастает во всем временном диапазоне и достигает максимума на 240 минуте, который составляет 95,3 %. Извлечение железа в раствор не превышало 12 %. Низкая степень перехода его в раствор связана с осаждением арсенатов железа согласно реакции 7. При растворении железа (III) взаимодействует с ионами мышьяка (V), образуются арсенаты железа, которые переходят в кек.

Как видно из рисунка 3 мольное отношение Fe/As уменьшается в процессе осаждения мышьяка с 7,8 до 0,96 за 240 мин., характерным для параскородита и скородита ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$), а значит переход мышьяка в кек сопровождается взаимодействием аморфных ферригидридов, гидроксидов и основных сульфатов железа с ионами мышьяка (V) с образованием параскородита и скородита.

Начальная концентрация ионов мышьяка (V) может сильно влиять на мольное отношение Fe/As в кеке. С целью определения максимально возможного количества осаждаемого мышьяка были проведены эксперименты при температуре 90 °С в течение 200 мин. с различным начальным мольным отношением железа в кеке к мышьяку в растворе $Fe/As = 0,4 - 1,3$ и $pH = 1,0, 1,5, 2,0$.

Как показано на рисунке 3, увеличение начального мольного отношения железа в кеке к мышьяку в растворе сильно влияет на их соотношение в осадке по-

сле осаждения. Снижение Fe_{Solid}/As_{Liquid} с 1,3 до 0,4 в растворе приводит к уменьшению их мольного отношения в кеке с 1,02 до 0,91, 0,75, 0,61 при pH = 1,0, 1,5, 2,0, соответственно. Резкое снижение Fe_{Solid}/As_{Solid} для всех значений pH наступает при $Fe_{Solid}/As_{Liquid} \leq 0.65$, причем чем выше кислотность раствора, тем менее выражен уклон кривой.

Мольное отношение железа к мышьяку в параскородите и скородите близко к 1. Повышенное содержание мышьяка в кеке относительно железа ($Fe_{Solid}/As_{Solid} < 0,95$) может указывать на образование других соединений. Согласно предыдущим исследованиям, арсенат железа $Fe(H_2AsO_4)_3 \cdot 5,5H_2O$ (kaatialaite) с мольным отношением $Fe_{Solid}/As_{Solid} = 0,33$ образуется только при $pH \leq 2$, при этом с увеличением $pH = 1,0 - 1,5$ происходит превращения водородного арсената железа в скородит или параскородит, соединения устойчивые в диапазоне $pH = 1,0-2,5$. Согласно рисунку 5, в настоящем исследовании pH имеет обратный эффект и с его увеличением мольное отношение Fe_{Solid}/As_{Solid} в кеке осаждения уменьшается.

По результатам исследований можно сделать вывод, что осадки после нейтрализации растворов золотодобывающих предприятий могут быть использованы для осаждения мышьяка. Оптимальными параметрами осаждения являются pH = 1,5 и температура 90 °С, продолжительность 240 мин., вместе с тем в осадок переходит 95,3 % мышьяка.

Увеличение начального мольного отношения железа в кеке к мышьяку в растворе сильно влияет на их соотношение в осадке после осаждения. Снижение Fe_{Solid}/As_{Liquid} с 1,3 до 0,4 в растворе приводит к уменьшению их мольного отношения в кеке с 1,02 до 0,91, 0,75, 0,61 при pH = 1,0, 1,5, 2,0, соответственно. Повышенное содержание мышьяка в кеке относительно железа ($Fe_{Solid}/As_{Solid} < 0,95$) может указывать на образование других соединений. Согласно предыдущим исследованиям, арсенат железа $Fe(H_2AsO_4)_3 \cdot 5,5H_2O$ (kaatialaite) с мольным отношением $Fe_{Solid}/As_{Solid} = 0,33$ образуется при $pH \leq 2$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 23-29-00744.

Список литературы

- 1 Антипов Н.И. О классах токсичности и степени опасности мышьяксодержащих промышленных отходов / Антипов Н.И., Васильева Л.Н. // Цветные металлы. - 1992. - №3. С. 9-11.
- 2 Monhemius, A.J. Removing and stabilizing As from copper refining circuits by hydrothermal processing / A.J. Monhemius, P.M. Swash // JOM. - 1999. - Vol. 51. - P. 30-33.
- 3 Антипов Н.И. Вывод мышьяка из технологического цикла в производстве цветных металлов // Цветные металлы. - 1996. - № 4. С. 56-59.
- 4 Fujita T. Effect of pH on atmospheric scorodite synthesis by oxidation of ferrous ions: physical properties and stability of the scorodite // Hydrometallurgy. - 2009. - Vol. 96. - P. 198-98.
- 5 Копылов Н.И. Проблемы мышьяксодержащих отвалов цветной металлургии // Цветные металлы. - 2013. - № 3. С. 30 - 34.
- 6 Fujita T. Novel atmospheric scorodite synthesis by oxidation of ferrous sulfate solution. Part I. // Hydrometallurgy, - 2008. - Vol. 90. - P. 92-102.
- 7 Fujita T. Novel atmospheric scorodite synthesis by oxidation of ferrous sulfate solution. Part II. Effect of temperature and air // Hydrometallurgy. - 2008. - Vol. 90. - P. 85-91.
- 8 G.Y. Cai, X. Zhu, K.Z. Li, X.J. Qi, Y.G. Wei, H. Wang, F.Y. Hao. Self-enhanced and efficient removal of arsenic from waste acid using magnetite as an in situ iron donator, Water Res. 157 (2019) 269–280.
- 9 T. Nishimura, R.G. Robins, Crystalline phases in the system Fe(III)-As(V)-H₂O at 25 °C, in: Second International Symposium on Iron control and disposal in Hydrometallurgy, J. Dutrizac, G.B. Harris (Eds.), Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, Ottawa, Canada, 1996, pp. 521–534.

ARSENIC PRECIPITATION ON THE GOLD PROCESSING ENTERPRISES WASTE

Karimov K.A.¹, Tretiak M.A.¹, Rogozhnikov D.A.¹

¹Scientific laboratory of advanced technologies for the complex processing of mineral and technogenic raw materials of non-ferrous and ferrous metals, INMT, UrFU, Yekaterinburg, Russia
kirill_karimov07@mail.ru

The necessity to increase the non-ferrous metals production in the conditions of decreasing mineral reserves forces industrial enterprises to involve various primary and technogenic low-grade polymetallic materials, middlings, etc. in the technological process. The general decline in the mineral material quality with the necessity to include the arsenic containing ore processing leads to large volumes of various intermediates formation that contains this highly toxic element [1].

A large amount of arsenic-containing waste is formed during the processing of refractory gold-bearing concentrates, where arsenic is in the form of arsenopyrite, scorodite, tennantite, etc. Iron arsenates are formed from these materials during autoclave oxidative leaching ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeAsO}_4 \cdot 0,68-0,77\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{AsO}_4)_x \cdot (\text{SO}_4)_y \cdot (\text{OH})_z \cdot w\text{H}_2\text{O}$, where $0,36 \leq x \leq 0,69$, $0,19 \leq y \leq 0,5$, $0,55 \leq z \leq 0,8$ and $0,2 \leq w \leq 0,45$ [2,3]. In the conditioning process of cakes for the subsequent extraction of gold, solutions containing Fe (III) and As(V) are formed.

Rapid neutralization of solutions with lime is one of the simplest ways to precipitate As(III) and As(V) as iron and calcium arsenites and arsenates at $\text{pH} = 3-4$. Complete purification of solutions from arsenic is achieved at a molar ratio of $\text{Fe}/\text{As} \geq 3$ [4]. The coprecipitation of Fe(III) and As(V) under the given conditions occurs in the form of ferrihydride, amorphous

iron arsenates of poorly crystallized scorodite. These compounds are converted to alpha-goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) over time during long-term storage and exposure to the environment, which leads to the transition of arsenic to the liquid phase [5]. Considering the high environmental hazard of arsenic, it is necessary to convert it into the form of slightly soluble low-toxic compounds. Scorodite ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is the least soluble and most stable form of arsenic, which is important for its burial [6,7].

In the production of non-ferrous metals from arsenic-containing concentrates and secondary raw materials, solutions are often formed without iron, but containing a significant amount of arsenic. Amorphous gypsum sediments containing ferrihydrides, iron hydroxides, and iron arsenates with mole ratio $\text{Fe}/\text{As} > 1$ in the cake could act as a source of iron for arsenic precipitation and scorodite production.

For the precipitation of arsenic, an amorphous iron-containing gypsum cake was used from one of the gold mining enterprises operating on the technology of autoclave processing of sulfide pyrite-arsenopyrite concentrates. The cake was obtained at the stage of purification of the autoclave residue conditioning solution from arsenic (V) and iron (III) by neutralization with lime at $\text{pH} = 3-4$. The chemical composition of the material, %: 16,7 S; 12,1 Fe; 23,5 Ca, 1,0 C; 2,1 As. The mole ratio in the initial material is Fe/As

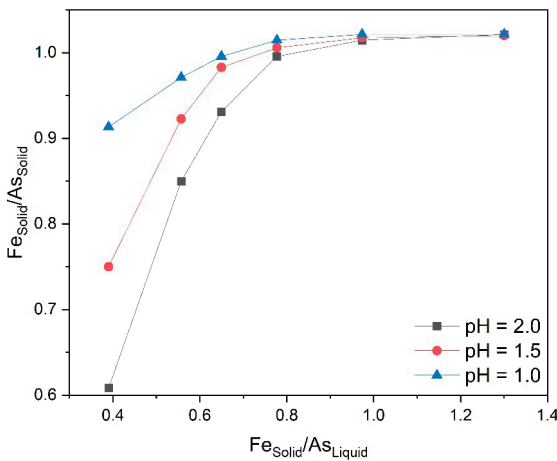
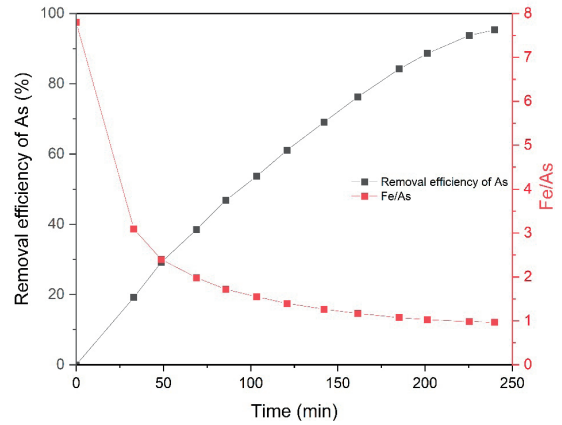
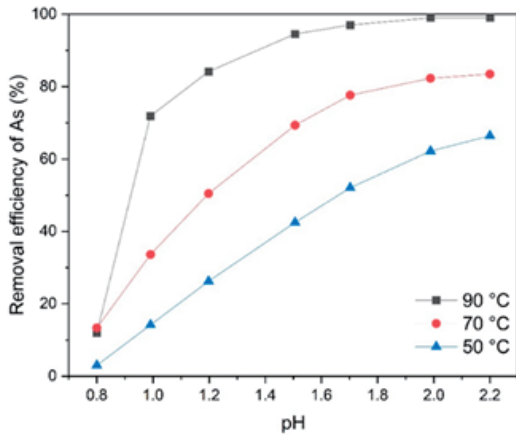


Figure 1 – The dependence of the degree of precipitation of arsenic (V) from the solution on temperature and pH

Figure 2 – The dependence of the degree of precipitation of arsenic (V) from the solution and the molar ratio of Fe / As in the cake on the duration

Figure 3 – The dependence of the molar ratio Fe_{Solid}/As_{Solid} in the cake after the precipitation on the initial molar ratio of iron in the cake to arsenic in the solution Fe_{Solid}/As_{Liquid}

= 7,8; in scorodite or iron arsenate, this ratio is 1, which means that this material can act as the source of iron for arsenic precipitation. Gypsum ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) is the main phase in the material. Small peaks of parascorodite ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$) indicate the predominance of amorphous iron arsenates. Solution pH is one of the key parameters affecting the formation of scorodite. Therefore, the range of pH = 0,8 – 2,2 was studied to assess the effect of the process pH on the precipitation of arsenic (V) from solution. Since the effect of pH on the precipitation efficiency can decrease with a large excess of added iron, the initial molar ratio of iron in the cake to arsenic in the Fe/As solution was used = 1.0. The process temperature was maintained at 90, 70, and 50 °C; the duration was limited to 240 min.

At the beginning of the precipitation process, the solution pH increased, which may be due to the interaction of calcite residues with sulfuric acid. To maintain the pH at the required level, sulfuric acid diluted 1:1 was used. The results showed that at pH = 0,8, the degree of arsenic (V) precipitation did not exceed 13 %, and the iron contained in the gypsum cake was dissolved by 85 % even at a temperature of 90 °C (Figure 1).

Increasing the pH to 1 contributes to a sharp increase in the degree of arsenic removal from the solution. Arsenic precipitation at pH = 1 and 50, 70, 90 °C was 14,7 %, 33,6 %, and 71,9 %, respectively. The maximum purification efficiency of the solution was achieved in the range pH = 2,0–2,2 and at 50, 70, 90 °C was 66,4 %, 83,5 %, 99,1 %, respectively. The optimal

precipitation parameters are pH = 1.5 and a temperature of 90 °C; wherein 95,3 % of arsenic is precipitated. Previous studies have shown that at a pH value of $\leq 1,5$, the conversion of iron hydrogen arsenate to scorodite accelerates [8]. However, at low pH $\leq 1,0$, phases $\text{Fe}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_3 \cdot 5,5\text{H}_2\text{O}$ (kaatialaite) and $\text{FeH}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (kamarizaite) are formed [9], which are less stable than scorodite, leading to the arsenic transition into solution upon contact with water. The study of the effect of duration on the precipitation of arsenic (V) and the Fe/As molar ratio in the cake was studied at a temperature of 90 °C, pH = 1,5. To level out the effect of a large excess of added iron, the initial molar ratio of iron in the cake to arsenic in the solution Fe/As = 1,0 was used. The dependence of the degree of arsenic (V) precipitation from the solution and the Fe/As molar ratio in the cake on the duration is shown in Figure 2.

According to the graph presented in Figure 2, the degree of arsenic precipitation gradually increases over the entire time range and reaches a maximum at 240 min, which is 95,3 %. The extraction of iron into solution did not exceed 12 %. The low degree of its transition into the solution is associated with the precipitation of iron arsenates according to reaction 7. When dissolving, iron (III) interacts with arsenic (V) ions, iron arsenates are formed, which pass into the cake. As can be seen from Figure 3, the Fe/As molar ratio decreases during arsenic precipitation from 7,8 to 0,96 in 240 min, which is characteristic of parascorodite and scorodite ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), which means that the transition of arsenic to the cake is accompanied by the interaction of amorphous ferrihydrides, hydroxides, and basic sulfates iron with arsenic (V) ions with the formation of parascorodite and scorodite.

The initial concentration of arsenic (V) ions can strongly influence the Fe/As molar ratio in the cake. To determine the maximum possible amount of precipitated arsenic, experiments were carried out at a temperature of 90 °C for 200 min with different initial molar ratio of iron in the cake to arsenic in solution Fe/As = 0,4 – 1.3 and pH = 1,0, 1,5, 2,0.

As shown in Figure 3, an increase in the initial molar ratio of iron in the cake to arsenic in solution strongly affects their ratio in the sediment after settling. Decreasing $\text{Fe}_{\text{Solid}}/\text{As}_{\text{Liquid}}$ from 1,3 to 0,4 in the solution leads to a decrease in their molar ratio in the cake from 1,02 to 0,91, 0,75, and 0,61 at pH = 1,0, 1,5, 2,0, respectively. A sharp decline of $\text{Fe}_{\text{Solid}}/\text{As}_{\text{Solid}}$ for all pH values occurs at $\text{Fe}_{\text{Solid}}/\text{As}_{\text{Liquid}} \leq 0,65$, moreover, the higher acidity of the solution, the less pronounced the slope of the curve.

The mole ratio of iron to arsenic in parascorodite and scorodite is close to 1. An increased arsenic content in the cake relative to iron ($\text{Fe}_{\text{Solid}}/\text{As}_{\text{Solid}} < 0,95$) may indicate the formation of other compounds.. According to previous studies, iron arsenate $\text{Fe}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_3 \cdot 5,5\text{H}_2\text{O}$ (kaatialaite) with a molar ratio $\text{Fe}_{\text{Solid}}/\text{As}_{\text{Solid}} = 0,33$ is formed only at pH ≤ 2 , while with an increase in pH = 1,0 – 1,5, the hydrogen iron arsenate to scorodite or parascorodite, compounds stable in the pH range = 1,0-2,5. As shown in Figure 3, pH has the opposite effect in the present study, and as it increases, the $\text{Fe}_{\text{Solid}}/\text{As}_{\text{Solid}}$ molar ratio in the sedimentation cake decreases.

According to the research results, it can be concluded that the sediments after neutralization of solutions of gold mining enterprises can be used to precipitate arsenic. The optimum precipitation parameters are pH = 1,5, temperature

90 °C, duration 240 min., at the same time, 95,3% of arsenic passes into the precipitate.

An increase in the initial molar ratio of iron in the cake to arsenic in solution greatly affects their ratio in the sediment after precipitation. Decreasing Fe_{Solid}/As_{Liquid} from 1,3 to 0,4 in the solution leads to a decrease in their molar ratio in the cake from 1,02 to 0,91, 0,75, 0,61 at pH = 1,0, 1,5, 2,0, respectively. An increased arsenic content in the cake relative to iron ($Fe_{Solid}/As_{Solid} < 0,95$) may indicate

the formation of other compounds. According to previous studies, iron arsenate $Fe(H_2AsO_4)_3 \cdot 5,5H_2O$ (kaatialaite) with the molar ratio of $Fe_{Solid}/As_{Solid} = 0,33$ is formed at pH ≤ 2 .

The study was financially supported by the Russian Science Foundation project № 23-29-00744.

References

- 1 Antipov N.I. On the toxicity classes and the degree of danger of arsenic-containing industrial waste / Antipov N.I., Vasilyeva L.N. // Non-ferrous metals. – 1992. – Vol. 3. – P. 9-11.
- 2 Monhemius, A.J. Removing and stabilizing As from copper refining circuits by hydrothermal processing / A.J. Monhemius, P.M. Swash // JOM. – 1999. – Vol. 51. – P. 30-33.
- 3 Antipov N.I. The withdrawal of arsenic from the technological cycle in the production of non-ferrous metals // Non-ferrous metals. – 1996. – Vol. 4. – P. 56-59.
- 4 Fujita T. Effect of pH on atmospheric scorodite synthesis by oxidation of ferrous ions: physical properties and stability of the scorodite // Hydrometallurgy. - 2009. - Vol. 96. - P. 198-98.
- 5 Kopylov N.I. Problems of arsenic-containing dumps of non-ferrous metallurgy // Non-ferrous metals. – 2013. – Vol. 3. – P. 30-34.
- 6 Fujita T. Novel atmospheric scorodite synthesis by oxidation of ferrous sulfate solution. Part I. // Hydrometallurgy, - 2008. - Vol. 90. - P. 92-102.
- 7 Fujita T. Novel atmospheric scorodite synthesis by oxidation of ferrous sulfate solution. Part II. Effect of temperature and air // Hydrometallurgy. - 2008. - Vol. 90. - P. 85-91.
- 8 G.Y. Cai, X. Zhu, K.Z. Li, X.J. Qi, Y.G. Wei, H. Wang, F.Y. Hao. Self-enhanced and efficient removal of arsenic from waste acid using magnetite as an in situ iron donator, Water Res. 157 (2019) 269–280.
- 9 T. Nishimura, R.G. Robins, Crystalline phases in the system Fe(III)-As(V)-H₂O at 25 °C, in: Second International Symposium on Iron control and disposal in Hydrometallurgy, J. Dutrizac, G.B. Harris (Eds.), Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, Ottawa, Canada, 1996, pp. 521–534.