

ВЫДЕЛЕНИЕ СЕРЕБРА ИЗ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ ИЗДЕЛИЙ

Н. А. Кузнецова, О. А. Сахненко, А. Г. Харлова, Е. В. Лызлова, П. Ю. Зимин

ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 08 июля 2021 г.

В ходе проведения исследований была разработана технология выделения серебра из радиоактивно загрязненных серебросодержащих изделий. Она включает следующие этапы: предварительную дезактивацию изделий, растворение серебряных фрагментов изделий в азотнокислом растворе, получение мелкодисперсного серебра путем вытеснения металлического серебра медью и сплавление мелкодисперсного серебра под флюсом при температуре не менее 960 °С. С целью снижения себестоимости технологии проведена оценка возможности извлечения серебра из его соединений: хлорида, сульфата и оксида.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, дезактивация, серебро, радиоактивное загрязнение, осаждение, восстановление серебра, чернь, переплав, слитки.

Введение

В настоящее время на некоторых предприятиях атомной отрасли образуются радиоактивные серебросодержащие отходы. В процессе эксплуатации эти детали и элементы оборудования находятся в контакте с радиоактивными веществами и, в частности, с плутонием, вследствие чего их неснимаемое загрязнение по α -активности достигает 10^5 α -част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$), а снимаемое — до 10^4 α -част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$).

С целью повторного использования серебра необходимо дезактивировать до величины общего загрязнения, не превышающей значений, установленных санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (далее — ОСПОРБ-99/2010) [1]. Согласно ОСПОРБ-99/2010 радиоактивное загрязнение металлов, используемых в народном хозяйстве, не должно превышать $1,0$ α -част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$), при этом снимаемое

загрязнение не допускается, мощность дозы гамма-нейтронного излучения не должна превышать $0,2$ мкЗв/ч, а удельная активность плутония в металле должна быть менее $0,1$ Бк/г.

Цель работы заключалась в создании метода, обеспечивающего высокую степень очистки драгметалла от плутония и сопутствующих химических элементов, а также минимальные потери серебра при реализации процесса очистки и снижение затрат на переработку вторичных отходов.

На первом этапе работы проводили серии экспериментов по дезактивации методом погружения изделий, содержащих серебряные фрагменты, в смеси концентрированных фосфорной и серной кислот при объемном соотношении 2:1 с добавлением лимонной кислоты до массовой концентрации 50 г/дм³ при температурах 60 и 90 °С в течение 1 ч. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты дезактивации изделий, содержащих серебряные фрагменты

| Условный номер изделия | Ультразвуковая обработка | Температура дезраствора, °С | Начальное снимаемое загрязнение, част./см ² ·мин | Остаточное снимаемое загрязнение, част./см ² ·мин | Коэффициент дезактивации K _д |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------|---|--|---|
| 1 | Не применялась | 60 | 43600 | 32 | 1362 |
| 2 | | | 240 | 16 | 15 |
| 3 | | | 74800 | 224 | 334 |
| 4 | Применялась | 90 | 1400 | 20 | 70 |
| 5 | | | 1000 | фон | более 500 |
| 6 | | | 1000 | 12 | 83 |
| 7 | | | 1760 | 28 | 63 |
| 8 | | | 1960 | 36 | 54 |
| 9 | | | 4600 | 736 | 60 |

Как видно из табл. 1, этот раствор показал высокую эффективность.

Растворение непосредственно серебряных фрагментов изделий проводили в азотной кислоте с массовой концентрацией 450 г/дм³ при температуре 60 °С с применением ультразвуковой обработки раствора до полного растворения серебра в течение 40—90 мин. Завершение процесса оценивали визуально. Составы растворов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Составы азотнокислых растворов после растворения серебра

| Условный номер изделия | Объем азотнокислого раствора, см ³ | Массовая концентрация, мг/дм ³ | | | | | | |
|------------------------|---|---|----|-----|-----|----|------|---------------------|
| | | Ag | Ti | Fe | Ni | Cr | Al | Pu |
| 1—3 | 100 | 161,4·10 ³ | 7 | 110 | 308 | 8 | 240 | 35·10 ⁻³ |
| 4—9 | 200 | 181,6·10 ³ | 26 | 60 | 790 | 10 | 1022 | 9·10 ⁻³ |

Полученные после растворения серебряных фрагментов изделий № 1—3 и № 4—9 растворы направили соответственно на сорбционную очистку и на проведение восстановления серебра с помощью металлической меди.

В растворе, поступающем на сорбционную очистку, проводили корректировку концентрации азотной кислоты до значения, при котором

обеспечивается наиболее эффективная сорбция плутония. Его извлечение из растворов проводили в динамическом режиме при скорости фильтрования раствора 1 к.о./ч. Объем сорбента в колонке составлял 5 см³ (соотношение высоты к диаметру Н: D равнялось 5: 1), в его составе использовались ионообменные материалы:

- анионит ВП-3Ап;
- катионит Purolite S957;
- импрегнированный сорбент AXION MND 40Т.

Десорбцию плутония из фазы анионита проводили азотной кислотой с концентрацией 0,5 моль/дм³, из фазы катионита — восстановительным раствором с:

- массовой концентрацией аскорбиновой кислоты 10 г/дм³;
- молярной концентрацией гидразина 0,2 моль/дм³;
- молярной концентрацией азотной кислоты 3,5 моль/дм³.

Десорбцию плутония из фазы импрегнированного сорбента проводили раствором ДТПА с массовой концентрацией 10 г/дм³ при значении рН = (5,5 ± 0,5).

Время контакта раствора с сорбентом на стадии десорбции — 60 мин. Результаты опытов по извлечению плутония из растворов после растворения серебряных фрагментов изделий № 1—3 приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты опытов по извлечению плутония из растворов после растворения серебряных фрагментов

| Сорбент | Состав исходного раствора | | | Объем пропущенного раствора, к.о. | Массовая концентрация в фильтрате | | Количество сорбированного серебра, % от исходного |
|----------------|---------------------------|-----------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---|
| | Pu, мкг/дм ³ | Ag, г/дм ³ | HNO ₃ , моль/дм ³ | | Pu, мкг/дм ³ | Ag, г/дм ³ | |
| ВП-3Ап | 27 | 110,0 | 6,5 ± 0,5 | 4 | фон | 80,5 | 26,8 |
| Purolite S 957 | 35 | 161,0 | 4,5 ± 0,5 | 2 | фон | 104 | 35,4 |
| AXION MND 40Т | 16 | 76,8 | 2,5 ± 0,5 | 1 | фон | 52,3 | 31,9 |
| | 35 | 159,3 | 4,5 ± 0,5 | 1 | фон | 112,4 | 29,4 |
| | 27 | 137,5 | 6,5 ± 0,5 | 1 | фон | 90,3 | 34,3 |

В ходе проведения работ было установлено, что процесс сорбции с применением различных материалов позволяет провести очистку раствора от активности, обусловленной присутствием Рu, до уровней фона.

Однако следует отметить, что в ходе сорбционной очистки, помимо извлечения плутония, происходит также сорбция серебра, что приводит к его значительным потерям (до 35 %).

Этот процесс на анионите обусловлен тем, что в растворе азотной кислоты с молярной концентрацией $(6,5 \pm 0,5)$ моль/дм³ серебро находится в виде анионного комплекса $[\text{Ag}(\text{NO}_3)_2]^-$. Сорбция серебра на катионите из раствора с молярной концентрацией азотной кислоты $(4,5 \pm 0,5)$ моль/дм³ обусловлена его нахождением в растворе в виде катиона Ag^+ . Было установлено, что на катионите Purolite S957 также происходит очистка раствора от таких примесей, как алюминий, никель и титан. Степень сорбции данных компонентов составляет 78, 34 и 86 % соответственно. Частичное извлечение серебра на импрегнированном сорбенте AXION MND 40T, по-видимому, связано с образованием комплекса, в котором серебро связывается с молекулой дигликольамида через эфирный кислород.

Было установлено, что при пропускании 4 к.о. десорбирующих растворов из фазы импрегнированного сорбента можно извлечь от 10 до 25 % плутония и серебра, из фазы катионита — 65 %, из фазы анионита — 100 %.

Ввиду значительных потерь серебра (до 35 %) на операции сорбционной очистки азотнокислого раствора от Рu принято решение не включать данный этап в технологию переработки серебросодержащих радиоактивных отходов.

Смесь после растворения серебряных фрагментов изделий № 4—9 направили на операцию получения серебра в виде мелкодисперсного порошка путем восстановления его при помощи металлической меди. Массовая концентрация Рu в растворе составляла 9 мкг/дм³. Процесс проводили при комнатной температуре до окончания экзотермической реакции, сопровождающейся выделением NO_2 в результате разложения нитрата серебра — реакция (1). Необходимый расход меди определяли стехиометрически по химической реакции (2).



Полученный порошок серебра (чернь) многократно промывали дистиллированной водой, затем очищали на бумажном фильтре и сушили на воздухе в течение одних суток. Потери серебра при фильтрации составили не более 1,5 %.

Далее навеску полученного порошка растворили в азотной кислоте с массовой концентрацией 450 г/дм³. В полученной пробе определили наличие примесей и массовую концентрацию серебра.

Исходя из анализа проб, массовая доля примесей в порошке серебра составила от 10 до 14 %. Такое количество примесей объясняется неполной промывкой черни от сопутствующих солей металлов и возможным последующим их гидролизом. Количество невосстановленного серебра в азотнокислом маточном растворе составило не более 0,005 %. Содержание Рu в черни составило 675 Бк/кг. Согласно правилам [1] удельная активность Рu в металле не должна превышать 0,1 Бк/г.

Для достижения требуемой чистоты драгметалла провели операцию сплавления черни под флюсом при температуре от 970 до 1100 °С. Время выдержки составило от 10 до 15 мин. В качестве флюса использовали смесь тетрабората натрия с карбонатом натрия в массовом соотношении 3 : 2.

Радиационную чистоту драгметалла после операции сплавления определяли радиометрическим методом путем измерения плотности потока α -частиц с поверхности слитка, которая не превышала фоновых значений радиометрической установки УИМ-2Д (фон составлял 0,6 α -част./см²-мин). Проведенный по методике [2] анализ показал, что в ломе серебра техногенные α -излучатели отсутствуют. По уровням радиоактивного загрязнения металл соответствовал нормам [1].

Незначительная часть серебра (примерно 0,2 %) осталась в шлаке и на стенках тигля. Фактические потери драгметалла при переплаве отсутствовали.

В итоге была рекомендована технология переработки серебросодержащих металлических радиоактивных отходов, которая включала в себя следующие этапы [3]:

1. Проведение операции предварительной дезактивации погружением изделий в смесь концентрированных фосфорной и серной кислот с добавлением лимонной кислоты при температуре 90 °С в течение 1 ч.

2. Растворение серебросодержащих фрагментов в растворе азотной кислоты с массовой концентрацией 450 г/дм³ при температуре 60 °С с применением ультразвуковой обработки.

3. Получение мелкодисперсного серебра в виде черни путем восстановления металлического серебра медью из азотнокислого раствора.

4. Многократная промывка дистиллированной водой полученного порошка серебра, очистка на

бумажном фильтре и сушка на воздухе в течение одних суток.

5. Сплавление мелкодисперсного серебра под флюсом в корундовых тиглях при температуре от 970 до 1100 °С в течение 10–15 мин. В качестве флюса использовали смесь тетрабората натрия с карбонатом натрия при массовом соотношении 3 : 2.

6. Удаление шлака с поверхности слитков сначала механически, а затем травлением в растворе серной кислоты с массовой концентрацией 100 г/дм³.

Разработанная технология позволила достичь уровней остаточного загрязнения металла, не превышающих фоновых значений радиометрической установки, равных 0,6 α-част./(см²·мин). Проведенный α-спектрометрический анализ отобранной стружки из всех полученных слитков показал, что в ломе серебра техногенные α-излучатели отсутствуют.

Потери драгметалла при проведении всех операций составили около 10 %.

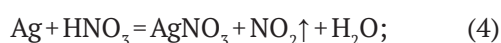
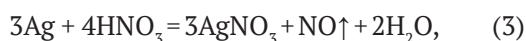
Для оптимизации потерь драгметалла, сокращения количества операций выделения серебра, а следовательно, и себестоимости процесса были проведены серии экспериментов по извлечению серебра из его соединений: хлорида, сульфата и оксида.

Цель работы заключалась в оценке принципиальной возможности получения слитков серебра из сульфата и оксида, а также в разработке технологий выделения драгметалла через стадию восстановления черни серебра из хлорида. Испытания проводились на слитках серебра, не имеющих радиоактивного загрязнения.

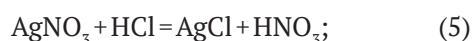
Разработка технологии получения металлического серебра из хлорида серебра

Для очистки серебра от α-загрязнения была опробована технология [4], включающая следующие операции:

- растворение серебра в азотной кислоте с массовой концентрацией 450 г/дм³ при температуре 60 °С с применением ультразвуковой обработки. Реакция протекает по уравнениям (3), (4):

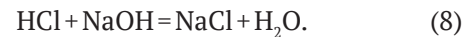
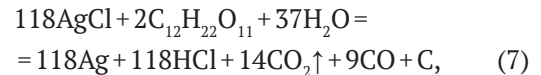
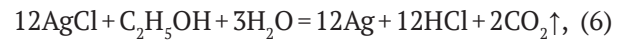


- осаждение хлорида серебра путем добавления в азотнокислый раствор концентрированной соляной кислоты протекает по формуле (5):



- декантация осадка;

- восстановление серебра из хлорида в виде черни водным раствором этилового спирта и сахарозы при температуре от 50 до 70 °С до прекращения выделения газа CO₂ (2–3 ч) с одновременной нейтрализацией избытков соляной кислоты гидроксидом натрия. Реакции восстановления протекают по уравнениям (6)–(8):



При атмосферном давлении и умеренных температурах энергия активации восстановления серебра из его хлорида водным раствором спирта достаточно высокая, однако процесс практически не идет. Он протекает с высокими скоростями при нагреве смеси от 50 до 70 °С и выше. В спиртосодержащем растворе творожистый осадок хлорида серебра дезинтегрируется на мельчайшие частицы; это, в свою очередь, способствует увеличению скорости и полноты восстановления серебра из такого осадка. Кроме того, восстановительный потенциал системы сахар — спирт выше, чем при использовании одного из растворов;

- очистка мелкодисперсного осадка серебра на бумажном фильтре;
- высушивание осадка при комнатной температуре на воздухе;
- переплав мелкодисперсного серебра в корундовых тиглях под флюсом при температуре от 1000 до 1100 °С в течение не более 30 мин (осадок серебра сплавляли вместе с фильтром с целью снижения потерь драгметалла).

Результаты, условия и режимы проведения экспериментов приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, при различных соотношениях химреагентов потери драгметалла не превысили 10 %. Минимальные потери наблюдали во втором опыте.

По мнению авторов, опробованная технология позволит на стадии осаждения в значительной степени избавиться от радионуклидных примесей, а на стадии восстановления получить чернь с требуемыми контрольными уровнями по остаточному загрязнению. Проведение операции переплава черни в слитки при отработке технологии на серебросодержащих отходах, возможно не потребует, что значительно снизит себестоимость процесса. Кроме того, маточный раствор после осаждения хлорида серебра может быть направлен в оборот на растворение исходного сырья — реакция (5), а после восстановления серебра из него можно будет осадить

Таблица 4. Результаты проведения операций получения металлического серебра из хлорида (условия и режимы)

| Режим растворения и получения AgCl | Режим восстановления Ag из AgCl | Масса слитка, г | Потери серебра, % |
|---|--|-----------------|-------------------|
| Ag – 13,23 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 100 см ³ , концентрированная HCl – 13 см ³ | AgCl* – 16,27 г, NaOH – 20 г, NH ₄ OH – 1,5 г, 20 % C ₂ H ₅ OH – 75 см ³ , 85 % C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ – 50 г | 11,94 | 9,7 |
| Ag – 12,73 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 100 см ³ , концентрированная HCl – 30 см ³ | AgCl* – 16,9 г, NaOH – 15 г, 20 % C ₂ H ₅ OH – 60 см ³ , 85 % C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ – 17 г | 12,72 | 0 |
| Ag – 9,4 г, 450 г/ дм ³ HNO ₃ – 100 см ³ , концентрированная HCl – 10 см ³ | AgCl* – 12,5 г, NaOH – 19,7 г, 20 % C ₂ H ₅ OH – 90 см ³ , 85 % C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ – 18,65 г | 9,02 | 4,2 |
| Ag – 6,18 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 40 см ³ , концентрированная HCl – 7 см ³ | AgCl* – 9,76 г, NaOH – 10,0 г, 20 % C ₂ H ₅ OH – 60 см ³ , 85 % C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ – 13,2 г | 5,96 | 3,5 |

* расчетное количество.

хлорид из новой порции азотнокислого раствора – реакции (6) и (7), что, в свою очередь, позволит сократить объемы образующихся ЖРО.

Необходимо учитывать тот факт, что недопустимо наличие хлорид-иона в обратном азотнокислом растворе. Для предотвращения этого добавку обратного солянокислого раствора при осаждении серебра необходимо проводить при контроле в нем остаточного содержания серебра. опыты показали, что при содержании серебра в маточном растворе с массовой концентрацией в интервале 1–3 г/дм³, хлорид-ион в жидкой фазе практически отсутствует. Такое содержание серебра в растворе соответствует осаждению хлорида на ~98%. Присутствие в азотнокислом растворе, предназначенном для растворения серебра, от 2 до 5 мг/дм³ хлорид-ионов не оказывает негативного влияния на процесс растворения.

Как видно из табл. 4, массовая доля спирта в восстанавливающем хлорид серебра растворе составляла 20%. Данное содержание спирта в восстанавливающем растворе считается оптимальным. При меньшем его содержании эффективность влияния его на результат процесса невелика, а при большем, согласно литературным данным, – должно наблюдаться интенсивное

испарение спирта при температурах восстановления, при этом скорость процесса не возрастет.

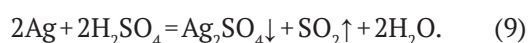
Для восстановления серебра в виде черни применяли сахарный сироп с массовой долей воды 15%. Если использовать сироп с большей концентрацией, потребуется перегрев раствора, а это в данном случае нежелательно, так как будет интенсивно испаряться спирт. При использовании более разбавленного сиропа увеличатся объемы оборотных растворов, а также снизится скорость восстановительной реакции.

Температуру процесса необходимо поддерживать в указанном диапазоне от 50 до 70 °С. При повышении температуры будет интенсивно испаряться спирт, скорости процесса и газовыделение будут чрезмерны (возможно выбрасывание или расплескивание растворов из емкостей, в которых проводится процесс восстановления).

Разработка технологии получения металлического серебра из сульфата серебра

Сульфат серебра получали двумя способами:

1. Растворением металлического серебра в горячей концентрированной серной кислоте согласно уравнению (9):

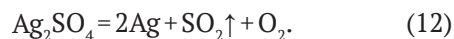


2. Осаждением из растворов в реакциях ионного обмена по уравнениям (10), (11):



Полученный осадок очищали на бумажном фильтре и высушивали на воздухе при комнатной температуре, затем сплавляли вместе с фильтром при температуре 1200 °С не более 3 ч.

Известно, что сульфат серебра образует бесцветные кристаллы, плавящиеся при 660 °С. При температуре от 750 до 1000 °С и выше кристаллы термически разлагаются с выделением металлического серебра [5] по уравнению (12):



Результаты экспериментов приведены в табл. 5.

Анализируя представленные результаты, можно сделать вывод, что величина полноты выпадения осадка сульфата серебра при использовании разбавленной серной кислоты и раствора сульфата натрия меньше в два-три раза, чем в случае применения концентрированной серной кислоты.

Однако применение концентрированной кислоты также не позволяет достичь 100-процентного образования осадка. Это объясняется тем, что произведение концентрации ионов серебра и

Таблица 5. Результаты эксперимента, условия и режимы получения сульфата серебра

| Режим растворения Ag и получения Ag ₂ SO ₄ | Масса слитка, г | Потери серебра, % |
|--|-----------------|-------------------|
| Ag – 14,43 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 100 см ³ , концентрированная H ₂ SO ₄ – 30 см ³ | 13,05 | 9,5 |
| Ag – 13,05 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 100 см ³ , 450 г/л H ₂ SO ₄ – 135 см ³ | 10,16 | 22,0 |
| Ag – 13,35 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 100 см ³ , 190 г/дм ³ H ₂ SO ₄ – 60 см ³ | 9,26 | 30,6 |
| Ag – 7,61 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 23 см ³ , концентрированная H ₂ SO ₄ – 4 см ³ | 6,83 | 10,2 |
| Ag – 6,83 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 20 см ³ , 820 г/дм ³ H ₂ SO ₄ – 4 см ³ | 5,66 | 17,0 |
| Ag – 5,35 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 20 см ³ , концентрированная H ₂ SO ₄ – 7 см ³ | 4,30 | 19,6 |
| Ag – 5,34 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 40 см ³ , горячая H ₂ O – 120 см ³ , Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O – 40,0 г | 3,62 | 32,2 |
| Ag – 9,98 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 40 см ³ , горячая H ₂ O – 60 см ³ , Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O – 25,6 г | 7,40 | 25,8 |
| Ag – 5,96 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 40 см ³ , горячая H ₂ O – 150 см ³ , Na ₂ SO ₄ – 45,0 г | 4,65 | 21,9 |

сульфат-ионов в растворе ($2,5 \cdot 10^{-5}$) незначительно превышает величину произведения растворимости сульфата серебра ($1,2 \cdot 10^{-5}$). Кроме того, при избыточном количестве серной кислоты одновременно с образованием сульфата серебра протекают реакции образования малодиссоциированных комплексных ионов AgSO₄⁻ и Ag(SO₄)₂³⁻, растворимых в той же серной кислоте [5].

Как видно из табл. 5, минимальные потери драгметалла составят не менее 10% только лишь при получении сульфата серебра за счет протекания реакции взаимодействия нитрата серебра с концентрированной серной кислотой.

Попытка растворения металлического серебра в горячей концентрированной серной кислоте не привела к положительным результатам. Данная реакция может протекать лишь в случае нахождения серебра в порошкообразном виде [5].

В ходе работы установлена принципиальная возможность переплава сульфата серебра.

Разработка технологии получения металлического серебра из его оксида

Оксид серебра получали из его азотнокислого раствора при взаимодействии с гидроксидом натрия по уравнению (13):



К азотнокислому раствору присыпали сухую щелочь в количестве, обеспечивающем нейтрализацию кислоты и образование окиси серебра. Далее осадок очищали на бумажном фильтре и промывали дистиллированной водой до нейтрального pH. После сушки осадок сплавляли.

Результаты экспериментов представлены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты эксперимента, условия и режимы получения оксида серебра

| Режим растворения Ag и получения Ag ₂ O | Масса слитка, г | Потери, % |
|--|-----------------|-----------|
| Ag – 5,43 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 30 см ³ , NaOH – 10,6 г | 5,24 | 3,5 |
| Ag – 5,24 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 30 см ³ , NaOH – 10,5 г | 5,19 | 0,9 |
| Ag – 5,17 г, 450 г/дм ³ HNO ₃ – 30 см ³ , NaOH – 10,5 г | 5,06 | 2,3 |

Из данных таблицы видно, что при получении металлического серебра из осажденного оксида серебра потери драгметалла не превысили 3,5%.

Данная технология позволит сократить количество операций, удешевить себестоимость процесса и уменьшить потери драгметалла при переработке серебряных фрагментов.

Заключение

Создана и протестирована схема переработки радиоактивных серебросодержащих отходов, включающая растворение серебросодержащих фрагментов изделий, осаждение (восстановление) серебра из азотнокислого раствора металлической медью и переплав сухого остатка в слитки.

Для оптимизации потерь драгметалла, сокращения количества операций выделения серебра, а следовательно, и снижения себестоимости

процесса при переработке серебросодержащих изделий в производственных условиях предложена технология по извлечению серебра из его оксида и солей: хлорида и сульфата.

Литература

1. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ – 99/2010).

2. МП-0401-35-00. Альфа-спектрометрический метод анализа. Методика выполнения измерений удельной (объемной) активности и определения

состава альфа-излучающих радионуклидов в веществах. ФГУП «ПО «Маяк». Инв. ЦЛ/6066.

3. Кузнецова Н. А., Сахненко О. А. и др. Разработка технологии выделения серебра из серебросодержащих трубопроводов изделий завода 20 : Отчет ФГУП «ПО «Маяк». — Озерск. Инв. № 2/580. 37 с.

4. Лобанов В. Г., Лебедь А. Б., Ашихин В. В. и др. Способ аффинажа серебра. Патент Российской Федерации RU 2 535 266, опубл. 10.12.2014. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/253/2535266.html>.

5. Реми Г. Курс неорганической химии. Пер. с нем. 11-го изд. В 2 т. / Под ред. чл.-корр. АН СССР А. В. Новоселовой. — М. : Изд-во Мир, 1963–1966.

Информация об авторах

Кузнецова Наталья Анатольевна, начальник группы дезактивации оборудования и специзделий центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456780, Челябинская обл., Озерск, ул. Ермолаева, д. 18), e-mail: roniku@mail.ru.

Сахненко Ольга Анатольевна, инженер-технолог центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456780, Челябинская обл., Озерск, ул. Ермолаева, д. 18), e-mail: sahnenko08@rambler.ru.

Харлова Александра Георгиевна, инженер-технолог центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456780, Челябинская обл., Озерск, ул. Ермолаева, д. 18), e-mail: alex.kharl@gmail.com.

Лызлова Евгения Викторовна, кандидат технических наук, начальник группы центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456780, Челябинская обл., Озерск, ул. Ермолаева, д. 18), e-mail: e-lyzlova@mail.ru.

Зимин Павел Юрьевич, инженер-технолог химико-металлургического завода, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская область, Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: Zimin_pyu@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

Кузнецова Н. А., Сахненко О. А., Харлова А. Г., Лызлова Е. В., Зимин П. Ю. Выделение серебра из радиоактивных отходов, полученных при утилизации серебросодержащих изделий // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 12–19. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-12-19.

SILVER RECOVERY FROM RADIOACTIVE WASTE GENERATED DUE TO THE DISPOSITION OF SILVER-CONTAINING PRODUCTS

Kuznetsova N. A., Sakhnenko O. A., Kharlova A. G., Lyzlova Ye. V., Zimin P. Yu.

FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Article received on July 08, 2021

The studies performed resulted in the development of a method enabling silver recovery from radioactively contaminated silver-containing products. This method includes the following stages: preliminary decontamination of products, dissolution of silver product fragments in a nitric acid solution, production of finely dispersed silver by

displacement of silver metal with copper, submerged melting of finely dispersed silver at a temperature of at least 960 °C. To reduce the operating costs, evaluated was the feasibility of silver recovery from its compounds (chloride, sulphate and oxide).

Keywords: radioactive waste, decontamination, silver, radioactive contamination, precipitation, silver recovery, niello, remelting, bars.

References

1. SP 2.6.1.2612 10. *Sanitarnye pravila "Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiacionnoy bezopasnosti (OSPORB-99/2010)"* [Sanitary rules. Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99/2010)].
2. MP-0401-35-00. *Al'fa-spektrometricheskii metod analiza. Metodika vypolneniya izmereniy udel'noy (ob'yemnoy) aktivnosti i opredeleniya sostava al'fa-izluchayushchikh radionuklidov v veshchestvakh* [Alpha spectrometric analysis method. Methods Applied to Measure Specific (Volumetric) Activity and to Identify the Composition of Alpha-emitting Radionuclides in Substances]. FSUE PA Mayak. Inv. TsL/6066.
3. Kuznetsova N. A., Sakhnenko O. A. Et al. *Razrabotka tekhnologii vydeleniya serebra iz serebrosoderzhashchikh truboprovodov izdelii zavoda 20* [Development of a technology for extracting silver from silver-containing pipelines of plant products 20]. Report FSUE PA Mayak, Ozersk. Inv. No. 2/580. 37 p.
4. Lobanov V. G., Lebed' A. B., Ashikhin V. V. et al. *Sposob affinazha serebra* [Silver refining method]. RU patent 2 535 266, publ. Dec. 10, 2014. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/253/2535266.html>.
5. Remy H. [*Lehrbuch der Anorganischen chemie*]. Moscow, Mir Publ., 1963—1966. (in Russian).

Information about the authors

Kuznetsova Natalya Anatolyevna, Head of the Group on Decontamination of Equipment and Special Products, Central Plant Laboratory, FSUE Mayak PA (18, Yermolayev st., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia), e-mail: poniku@mail.ru.

Sakhnenko Olga Anatolyevna, Process Engineer, Central Plant Laboratory, FSUE Mayak PA (18, Yermolayev st., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia), e-mail: sahnenko08@rambler.ru.

Kharlova Alexandra Georgiyevna, Process Engineer, Central Plant Laboratory, FSUE Mayak PA (18, Yermolayev st., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia), e-mail: alex.kharl. @ Gmail.com.

Lyzlova Yevgeniya Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Group, Central Plant Laboratory, FSUE Mayak PA (18, Yermolayev st., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia), e-mail: e-lyzlova@mail.ru.

Zimin Pavel Yuryevich, Process Engineer, Chemical Metallurgical Plant, FSUE Mayak PA (31, Lenin Ave., Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456784, Russia), e-mail: Zimin_pyu@mail.ru.

Bibliographic description

Kuznetsova N. A., Sakhnenko O. A., Kharlova A. G., Lyzlova Ye. V., Zimin P. Yu. Silver recovery from radioactive waste generated due to the disposition of silver-containing products. *Radioactive Waste*, 2021, no. 3 (16), pp. 12—19. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-12-19. (In Russian).