

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.15593/2224-9400/2025.2.09
УДК 544.653.3:546.24

Научная статья

**В.В. Межогских¹, В.А. Шунин¹,
К.Л. Тимофеев^{1,2}, Р.С. Воинков^{1,2}**

¹Уралэлектромедь, Верхняя Пышма, Российская Федерация

²Технический университет УГМК,
Верхняя Пышма, Российская Федерация

В.Г. Лобанов

Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

ОЧИСТКА ЧЕРНОВОГО ТЕЛЛУРА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ РАФИНИРОВАНИЕМ

Теллур является побочным продуктом переработки медных руд. Его объемы производства могут быть увеличены за счет большего извлечения при переработке исходного медного сырья. На АО «Уралэлектромедь» рафинирование черного теллура осуществляют восстановлением металлического теллура алюминиевой пудрой в щелочном растворе. Высокие производственные затраты обусловлены использованием дорогостоящего и взрывоопасного алюминиевого порошка, потерями теллура и драгоценных металлов при переработке осадка, в основном $Al(OH)_3$, повышающего вязкость шлаков при плавке. Электрохимические способы переработки технологических продуктов составляют широкий спектр, включающий получение композиционных электрохимических покрытий, выделение компонентов раствора методами электрофлотации и электросорбции, электроосаждения, анодное растворение металлов при электрохимическом окислении и др. Перспективным представляется альтернативный способ очистки теллура – электролитическое рафинирование в щелочном растворе, основанный на катодном восстановлении черного теллура до теллурида натрия Na_2Te , дителлурида натрия Na_2Te_2 и/или полителлуридов натрия Na_nTe_m , который через фильтровальную ячейку диффундирует в анодную область, где окисляется азрацией сжатым воздухом до металлического теллура. Представлены результаты исследований по электролитическому рафинированию черного теллура, получаемого при переработке медеэлектролитных шламов. В ходе ее выполнения была проведена оценка возможности применения технологии электролитического рафинирования как способа получения теллура марки Т1. Определены оптимальные режимные параметры получения кондиционных продуктов из черного

теллура, в частности рабочая площадь катода и катодная плотность тока. Проведена оценка выхода по току и степени очистки теллура после электролитического рафинирования. Результаты исследований показали возможность применения технологии электролитического рафинирования черного теллура.

Ключевые слова: *черновой теллур, рафинированный теллур, селен, примеси, электролитическое рафинирование, аэрация, восстановление.*

**V.V. Mezhogskikh¹, V.A. Shunin¹,
K.L. Timofeev^{1,2}, R.S. Voinkov^{1,2}**

¹Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation

²Technical University UMMC,
Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation

V.G. Lobanov

Ural Federal University, named after the first President
of Russia Boris Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

PURIFICATION OF ROUGH TELLURIUM BY ELECTROLYTIC REFINING

Tellurium is a by-product of processing copper ores, its production volumes can be increased due to greater extraction during the processing of the initial copper raw materials. At Uralelectromed JSC, roughing tellurium is carried out by reducing metallic tellurium with aluminum powder in an alkaline solution. High production costs are caused by the use of expensive and explosive aluminum powder, losses of tellurium and precious metals during the processing of sludge, mainly $Al(OH)_3$, which increases the viscosity of slags during melting. Electrochemical methods of processing technological products comprise a wide range, including the production of composite electrochemical coatings, separation of solution components by electroflotation and electrosorption, electrodeposition, anodic dissolution of metals during electrochemical oxidation, etc. An alternative method of tellurium purification seems promising – electrolytic refining in an alkaline solution based on cathodes reduction of rough tellurium to sodium telluride Na_2Te , sodium ditelluride Na_2Te_2 and/or sodium Na_nTe_m politellurides, which diffuses through the filter cell into the anode region where it is oxidized by aeration with compressed air to metallic tellurium. The results of research on the electrolytic refining of rough tellurium obtained during the processing of copper electrolyte sludge are presented. In the course of its implementation, an assessment was made of the possibility of using electrolytic refining technology as a method for obtaining T1 grade tellurium. The optimal operating parameters for obtaining conditioned products from rough tellurium, in particular the cathode working area and cathode current density, have been determined. The current yield and the degree of purification of tellurium after electrolytic refining were evaluated. The results of the research showed the possibility of using the technology of electrolytic finishing of rough tellurium.

Keywords: *rough tellurium, refined tellurium, selenium, impurities, electrolytic refining, aeration, reduction.*

Теллур является побочным продуктом переработки медных руд [1], его объемы производства могут быть увеличены за счет большего извлечения при переработке исходного медного сырья. В течение 1940–2010 гг. было произведено ~11 тыс. т рафинированного теллура, что составляет ~4,5 % теллура, который содержался в медном сырье. Почти 80 % очищенного теллура было использовано в качестве металлургических добавок к стали и цветным металлам в качестве добавки, улучшающей антикоррозионные и механические свойства [2].

Гидрометаллургические способы при получении теллура включают щелочное сульфидное выщелачивание [3], атмосферное щелочное выщелачивание [4], окислительное выщелачивание с использованием хлора [5, 6], выщелачивание теллура с помощью Na_2SO_3 и порошкообразного Fe [7]. Методы пирометаллургического рафинирования технического теллура – окислительная плавка и дистилляция [8, 9], термическое разложение гидрида теллура H_2Te [10]. Электрохимические способы переработки технологических продуктов составляют широкий спектр, включающий получение композиционных электрохимических покрытий [11–13], выделение компонентов раствора методами электрофлотации и электросорбции [14], электроосаждения [15–17], в том числе и теллура [18, 19], анодное растворение металлов при электрохимическом окислении [20, 21] и др.

На АО «Уралэлектромедь» рафинирование черного теллура (95–98 % Te) осуществляют восстановлением металлического теллура алюминиевой пудрой в щелочном растворе (рис. 1). Образующиеся теллуриды натрия (Na_2Te , Na_2Te_2) переходят в раствор, после чего его обрабатывают сжатым воздухом (аэрация), при этом протекает окисление теллурид-иона до элементного теллура [22]. Высокие производственные затраты обусловлены использованием дорогостоящего и взрывоопасного алюминиевого порошка, потерями теллура и драгоценных металлов при переработке осадка, в основном $\text{Al}(\text{OH})_3$, повышающего вязкость шлаков при плавке. Перспективным представляется альтернативный способ очистки теллура, не предусматривающий использование алюминия – электролитическое рафинирование в щелочном растворе, основанный на катодном восстановлении черного теллура до растворимых теллурида натрия Na_2Te , дителлурида натрия Na_2Te_2 и/или полителлуридов натрия Na_nTe_m . Католит через фильтровальную ткань диффундирует в анодную область, где окисляется аэрацией сжатым воздухом до металлического теллура.

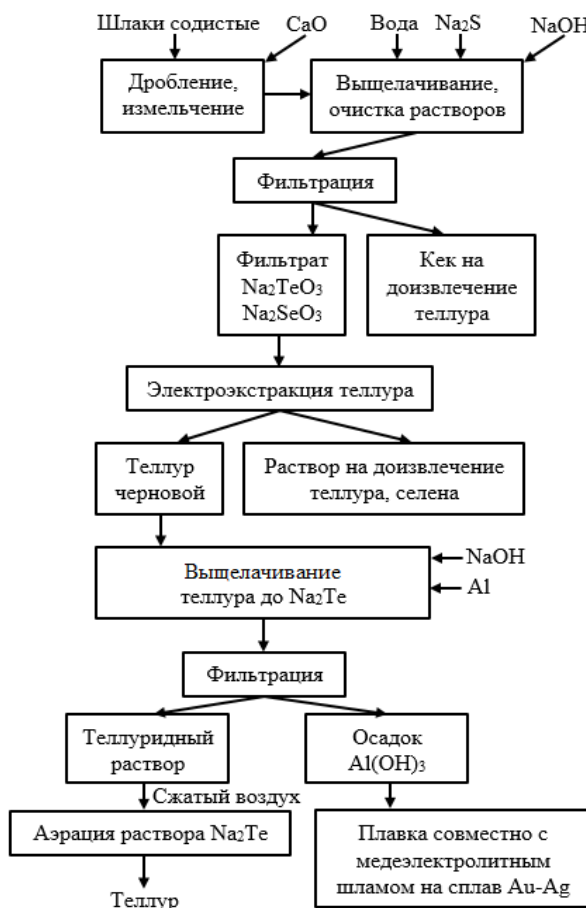


Рис. 1. Схема получения чернового теллура

Целью работы является разработка альтернативной схемы рафинирования чернового теллура с заменой стадии теллуридного рафинирования алюминиевой пудрой на электролитическое рафинирования и повышением его извлечения в готовую продукцию.

Экспериментальная часть. Электролитическое рафинирование проводили в укрупненно-лабораторном электролизере, объемом 10 дм³, специальной конструкции для данного процесса [23], выполненном из нержавеющей стали (рис. 2). Источником постоянного тока служил модульный преобразователь тока PULSAR SMART ($I_{\text{макс}} = 800 \text{ A}$). Электролитическому рафинированию подвергали черновой теллур с исходным составом, %: 92,9 Te, 2,0 Se, 0,16 S, 0,12 Pb, 0,1 Na, 0,09 Fe, 0,022 Al, 0,001 Si, 0,0006 Cu, получаемый при переработке шлаков содистых [24].

Черновой теллур в неизмельченном виде (табл. 1) загружали в перфорированный катодный стакан (2) до полного объема (4,5–5,5 кг),

отделенный от анодной области фильтровальной тканью (3), устойчивой к щелочи, после чего анодное (1) и катодное (выполнено из стальной стеки с различными размерами ячейки) (2) пространства заполняли раствором $100 \text{ г/дм}^3 \text{ NaOH}$.

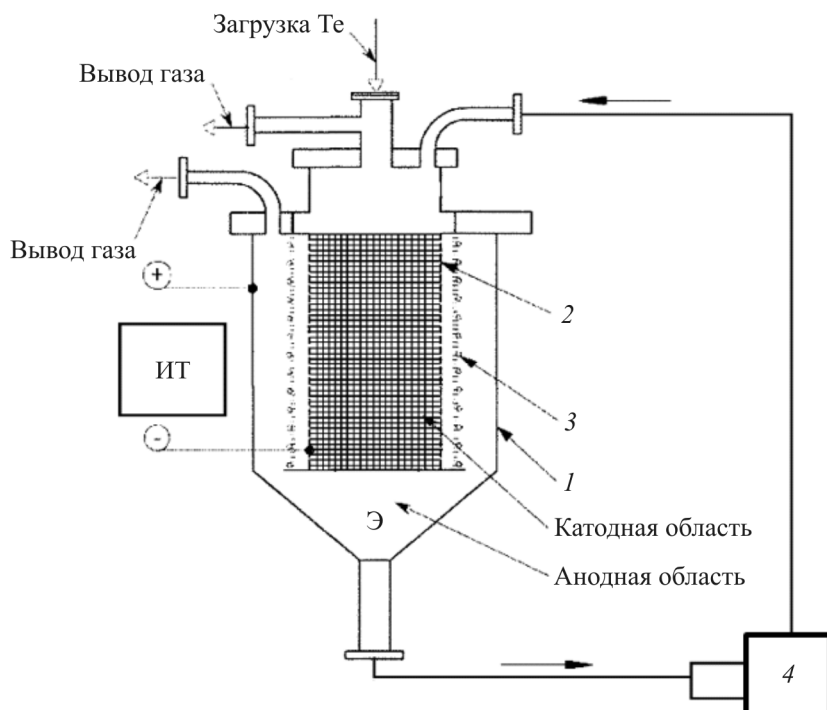


Рис. 2. Схема установки электролитического рафинирования теллура

Таблица 1

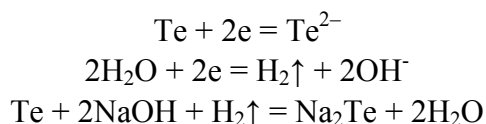
Гранулометрический состав черного теллура

Фракция, мм	Масса, г	Содержание, %
+40	0	0
–40+20	69,49	7,53
–20+10	93,82	10,16
–10+5	66,29	7,18
–5+0,63	31,50	3,41
–0,63+0	661,79	71,7
Сумма	922,89	100

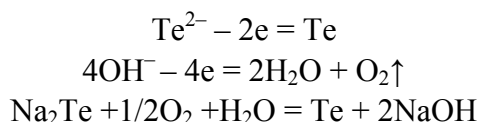
Циркуляция электролита осуществляется при помощи перистальтического насоса (4). Под действием электрического тока теллур восстанавливается в катодите с образованием теллурид-иона, концентрация которого в электролите возрастает до определенного уровня. Вы-

деляющийся кислород в свою очередь окисляет теллурид-ион в объеме анолита до элементного. Ниже приведены возможные катодные и анодные реакции.

Катодные реакции:



Анодные реакции:



В электролит вводили добавку 6,25 г/дм³ Na₂S для подавления соосаждения селена при последующей аэрации посредством связывания его в трудноаэрируемый селеносульфид. Процесс вели при расчетной катодной плотности тока 1600 и 1900 А/м², также варьировали величину рабочей площади катода за счет использования в качестве перегородки сеток с различной крупностью ячейки (0,045 и 0,071 мм) из нержавеющей стали.

Параметры электролитического рафинирования черного теллура:

– сила тока, А	210–250;
– рабочая площадь катода, см ²	1105–1314;
– содержание NaOH в электролите, г/дм ³	100;
– концентрация Na ₂ S в исходном растворе, г/дм ³	6,25;
– скорость циркуляции, дм ³ /ч (уд. катод. объемов/ч)	20 (7,3)*;
– масса навески черного теллура, г	4860–5430;
– продолжительность электролиза, мин	240;
– температура, °С	95–101;
– катодная плотность тока, А/м ²	1600–1900;
– анодная плотность тока, А/м ²	1167–1389.

* За один катодный объем принят объем катодного стакана (3 дм³).

Перед подачей в установку электролит разогревали до 70 °С. После включения модульного преобразователя температура возрастала до 98 °С за счет прохождения электрического тока. После завершения процесса проводили слив раствора с последующей фильтрацией на лабораторном вакуумном фильтре. Окончание восстановления теллура визуально определяют по цвету раствора, который приобретает насыщенную

темно-фиолетовую, характерную для полителлуридных растворов, окраску [22]. В результате получали катодный остаток (материал нерастворенный в катодной камере), анодный теллур (рафинированный теллур, образовавшийся в анодном пространстве за счет окисления выделившимся на аноде кислородом) и теллурсодержащий раствор, который подвергали аэрации с получением конечного продукта (Те после аэрации). При последующих расчетах выход катодного остатка определялся как отношение массы остатка черного теллура после электролиза к массе исходного загруженного теллура; распределение продуктов электролиза (анодного теллура и теллура после аэрации) определено как отношение их массы к фактической массе растворенного теллура.

Содержание компонентов в осадках определено методом атомной абсорбции на приборе Shimadzu AA-7000. Анализ растворов электролитического рафинирования с определением Se, Pb, Cu, S, Na, Si, Al, Fe выполнен методом атомно-абсорбционной спектроскопии (помимо Те). Концентрацию теллура в растворах определяли методом титриметрии.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры и показатели электрорафинирования черного теллура

Показатель	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5	Опыт 6
Площадь катода, см ²	1314	1105	1314	1105	1105	1314
Расчетная кат. плотность тока, А/м ²	1900	1900	1750	1750	1600	1600
Анод. плотность тока, А/м ²	1167	1389	1278	1083	1200	1167
Масса черного теллура, г	5030	5430	5350	4980	4860	5240
Те в растворе (теор.), г	1999	2380	2190	1856	1999	1999
Те в растворе (факт.), г	1660	2003	1621	1262	1403	1499
Масса Те анодного, г	1223	1922	1054	1121	1339	1319
Те после аэрации, г	394	29,7	504	70		112
Выход по току (по массе Те в продуктах + Те в растворе), %	83	82	74	68	72	75
Масса катодного остатка, г	3141	3312	3513	3488	3251	3411
<i>Распределение по массе (по убыли кат. Те)</i>						
Те анодный, %	74	96	65	89	95	88
Те после аэрации, %	24	1,5	31	5,5		7,5
Остаток Те в растворе, %	2,0	2,5	4,0	5,5	5,0	4,5

В дополнение к предыдущим результатам проведена серия из 6 экспериментов для оценки воспроизводимости ранее определенных режимов электрорафинирования (при расчетных плотностях тока 1900 и 1600 А/м²) [25], а также получения дополнительных сведений при промежуточной плотности тока (1750 А/м²) и изменении площади катода. В результате удалось подтвердить ранее выявленные зависимости выхода

по току от катодной плотности. Максимальный выход по току – 83 % (по массе теллура в продуктах и растворе) – зафиксирован при расчетной катодной плотности 1900 А/м² ($S_{\text{кат}} = 1314 \text{ см}^2$), как и на предыдущем этапе исследования. Высокий выход по току при наибольшей катодной плотности тока может быть обусловлен более интенсивным выделением водорода (в том числе атомарного) на катоде, что приводит к ускорению процесса восстановления теллура. Данная гипотеза требует подтверждения на этапе потенциостатических исследований процесса.

Показатели рафинирования теллура при площади катода 1105 см² и той же расчетной плотности сопоставимы, однако наблюдается снижение выхода теллура после аэрации с 24 до 1,5 % за счет более интенсивного образования кислорода на аноде, что приводит к увеличению выхода анодного теллура с 74 до 96 %. Следовательно, это делает операцию электрорафинирования при данном параметре наиболее предпочтительной, за счет сокращения времени аэрации.

При уменьшении расчетной плотности тока до 1750 А/м² выход по току снижается до 68–74 % (при площади катода 1105 и 1314 см² соответственно) по массе Те в продуктах и растворе, а при расчетной плотности тока 1600 А/м² составляет 72–75 % в зависимости от рабочей площади катода. Значения выхода по току приведены с учетом химического растворения теллура, которое составляет порядка 9,0–9,8 %.

Таблица 3

Состав продуктов электрорафинирования черного теллура, %

Элемент	Марка Т1 по ГОСТ 17614–2018	Те черновой	Те рафинированный опыт 1–6	Те технологический (теллуридное рафинирование)
Te	99,5	97,0	≥ 99,7	≥ 99,7
Se	0,1	2,6	≤ 0,06	≤ 0,02
Pb	0,1	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,0005
Cu	0,05	0,0009	≤ 0,0007	≤ 0,0005
S	0,04	0,038	≤ 0,04	≤ 0,04
Na	0,05	0,13	≤ 0,017	≤ 0,015
Si	0,05	0,018	≤ 0,0014	≤ 0,001
Al	0,04	0,016	≤ 0,0006	≤ 0,005
Fe	0,1	0,1	≤ 0,07	≤ 0,08
Примеси	0,53	2,91	≤ 0,19	≤ 0,14

Химический состав продуктов электрорафинирования представлен в табл. 3. Полученный теллур соответствует марке Т1 [26] по всем примесям, в пробе рафинированного теллура отмечено снижение содержания селена на 2,52–2,55 абс. % (97–98 отн. %); содержание теллура увеличивается на 2,5–2,8 абс. % (2,6–2,9 отн.%). Качество продук-

тов также сопоставимо с технологическим теллуrom, полученным при теллуридном рафинировании в текущих условиях производства.

Расчетная экономическая эффективность внедрения технологии электролитического рафинирования черного теллура по сравнению с теллуридным методом при среднем объеме производства ~30 000 кг/год оценивается в ~3,3 млн руб./год, что обусловлено снижением расхода алюминиевого порошка и сокращением потерь теллура при переплавке осадка восстановления.

Выводы:

1. Разработана альтернативная технология рафинирования теллура, основанная на катодном восстановлении черного теллура электрическим током, которая позволит снизить затраты на производство теллура за счет отказа от использования дорогостоящего и взрывоопасного алюминиевого порошка при рафинировании черного теллура, а также устранение потерь теллура и драгоценных металлов при переработке осадка, содержащего значительное количество $\text{Al}(\text{OH})_3$, влияющего на повышение вязкости шлаков при плавке.

2. Определена расчетная катодная плотность тока – 1900 А/м², при которой достигается выход по току на уровне 82–83 %.

3. При электролитическом рафинировании черного теллура получен очищенный теллур, соответствующий марке Т1. В результате увеличено содержание теллура в товарном продукте с 97 до 99,7 % (в среднем) и снижено содержание селена с 2,6 до 0,06 % (в среднем).

4. Расчетная экономическая эффективность от внедрения технологии электролитического рафинирования черного теллура в сравнении с текущей технологией теллуридного рафинирования при среднем объеме производства теллура ~30000 кг/год составит ~3,3 млн руб./год.

Список литературы

1. Ниценко, А.В. Изучение физико-химических свойств теллурсодержащего промпродукта / А.В. Ниценко, Н.М. Бурабаева, Ф.Х. Тулеутай // Комплексное использование минерального сырья. – 2020. – Т. 315, № 4. – С. 49–56.
2. Kavlak, G. Global anthropogenic tellurium cycles for 1940–2010 / G. Kavlak, T.E. Graedel // Resources, Conservation and Recycling. – 2013. – Vol. 76. – P. 21–26.
3. Guo, X. Recovery of tellurium from high tellurium-bearing materials by alkaline sulfide leaching followed by sodium sulfite precipitation / X. Guo, Z. Xu, D. Li // Hydrometallurgy. – 2017. – Vol. 171. – P. 355–361.

4. Xu, L. An environmental-friendly process for recovery of tellurium and copper from copper telluride / L. Xu, Y. Xiong, G. Zhang // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 272. – 122723.

5. Shaoa, L. A novel and clean process for extracting tellurium and bismuth from Dashuigou tellurium ore by oxidizing leaching / L. Shaoa, J. Diaoa, C. Jic // *Hydrometallurgy*. – 2020. – Vol. 191. – 105205.

6. Liu, W. A novel process for extracting tellurium from the calcine of copper anode slime via continuous enrichment / W. Liu, R. Jia, B. Sun // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 264. – 121637.

7. Shao, Li-x. Selective reduction separation and recovery of tellurium and bismuth from acidic leaching solution / Li-x. Shao, J. Diao, R.-x. Hu // *Trans. Non-ferrous Met. Soc. China*. – 2023. – Vol. 33. – P. 596–608.

8. Андреев, Ю.В. Пирометаллургическое рафинирование теллура / Ю.В. Андреев, Г.В. Петров, А.М. Беленький // *Труды Санкт-Петербургского государственного технического университета*. – 2009. – № 510. – С. 80–85.

9. Yi, J. An innovative green process for separating and enriching tellurium from lead anode slime via vacuum gasification / J. Yi, K. Cheng, G. Zha // *Journal of materials research and technology*. – 2022. – Vol. 16. – P. 599–607.

10. Mochalov, L. Purification of tellurium through thermal decomposition of the plasma prepared tellurium hydride / L. Mochalov, A. Logunov, A. Vorotyntsev // *Separation and Purification Technology*. – 2018. – Vol. 204. – P. 276–280.

11. Получение и свойства композиционных электрохимических покрытий с электрохимически диспергированным графеном на основе никелевой матрицы / И.В. Братков, Т.Ф. Юдина, А.Г. Мельников, А.В. Братков // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2020. – Т. 63, № 8. – С. 90–95.

12. Винокуров, Е.Г. Электроосаждение композиционных покрытий / Е.Г. Винокуров, Л.Н. Марголин, В.В. Фарафонов // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2020. – Т. 63, № 8. – С. 4–38.

13. Актуальные методы электрохимической обработки поверхности / Р.Ф. Шеханов, С.Н. Гридчин, И.В. Братков, Т.В. Ершова, М.Г. Донцов // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2023. – Т. 66, № 7. – С. 151–158.

14. Влияние солесодержания на эффективность очистки сточных вод от ионов железа (III) электрофлотосорбционным методом / А.М. Гайдукова, А.А. Похвалитова, Т.В. Конькова, А.Д. Стоянова // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2022. – Т. 65, № 12. – С. 119–125.

15. Киреев, С.Ю. Электроосаждение индия из сульфатного электролита с галогенид-анионами / С.Ю. Киреев, С.Н. Киреева // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2021. – Т. 64, № 10. – С. 65–71.

16. Оксалатно-аммонийные электролиты для электроосаждения сплавов цинк-железо / Р.Ф. Шеханов, С.Н. Гридчин, А.В. Балмасов, Н.Е. Мокрецов // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2021. – Т. 64, № 10. – С. 72–77.

17. Ларионова, М.П. Электроосаждение меди в ультразвуковом поле из отработанных травильных растворов / М.П. Ларионова, Н.Д. Соловьева,

Е.А. Савельева // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2020. – Т. 63, № 11. – С. 71–76.

18. Мирзоева, А.А. Электролитическое отделение селена от примесей теллура при переработке шламов химического комбината / А.А. Мирзоева, С.А. Агаева // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2015. – Т. 58, № 8. – С. 54–57.

19. Cook, D.A. Tellurium electrodeposition from tellurium (II) and (IV) chloride salts in dichloromethane / D.A. Cook, S.J. Reeves, W. Zhang // *Electrochimica Acta*. – 2023. – Vol. 456. – 142456.

20. Высокоскоростное анодное растворение хромоникелевой стали в нитратном растворе при термокинетической неустойчивости оксидной пленки / Е.В. Ликризон, Г.К. Дикусар, С.А. Силкин, А.И. Дикусар // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2022. – Т. 65, № 8. – С. 77–84.

21. Белова, В.С. Электрохимическое поведение серебра в хлоридсодержащих растворах при циклической поляризации / В.С. Белова, А.В. Балмасов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2021. – Т. 64, вып. 11. – С. 50–56.

22. Лебедь, А.Б. Производство селена и теллура на ОАО «Уралэлектромедь» / А.Б. Лебедь, С.С. Набойченко, В.А. Шунин // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 112 с.

23. Пат. 2817809, Рос. Федерация, СПК C25C 5/02; C01B 19/02; C22B 61/00; C22B 9/226. Способ электролитического рафинирования черного теллура / Тимофеев К.Л., Воинков Р.С., Шунин В.А., Мальцев Г.И., Новокшанова В.Н., Межогских В.В. – № 2023111540; заявл. 02.05.2023; опубл. 22.04.2024. – 9 с.

24. Мастюгин, С.А. Шламы электролитического рафинирования меди и никеля / С.А. Мастюгин, Н.А. Волкова, С.С. Набойченко. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 257 с.

25. Электролитическое рафинирование черного теллура / В.В. Межогских, В.Н. Новокшанова, Р.С. Воинков, В.А. Шунин // Современные технологии производства цветных металлов: материалы Междунар. науч. конф., посвящ. памяти С.С. Набойченко / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2023. – С. 80–86.

26. ГОСТ 17614–2018. Теллур технический. Технические условия / Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.

References

1. Nicenko A. V., Burabaeva N. M., Tuleutaj F.H. Izuchenie fiziko-himicheskikh svojstv tellursoderzhashhego promprodukta [Study of physicochemical properties of tellurium-containing intermediate product]. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syrja*, 2020, vol. 315, no. 4, pp. 49–56.

2. Kavlak G., Graedel T.E. Global anthropogenic tellurium cycles for 1940–2010. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, vol. 76, pp. 21–26.

3. Guo X., Xu Z., Li D. Recovery of tellurium from high tellurium-bearing materials by alkaline sulfide leaching followed by sodium sulfite precipitation. *Hydrometallurgy*. 2017, vol. 171, pp. 355–361.
4. Xu L., Xiong Y., Zhang G. An environmental-friendly process for recovery of tellurium and copper from copper telluride. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 272, 122723.
5. Shaoa L., Diaoa J., Jic C. A novel and clean process for extracting tellurium and bismuth from Dashuigou tellurium ore by oxidizing leaching. *Hydrometallurgy*. 2020, vol. 191, 105205.
6. Liu W., Jia R., Sun B. A novel process for extracting tellurium from the calcine of copper anode slime via continuous enrichment. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 264, 121637.
7. Shao Li-x., Diao J., Hu R.-x. Selective reduction separation and recovery of tellurium and bismuth from acidic leaching solution. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2023, vol. 33, pp. 596–608.
8. Andreev Yu .V., Petrov G.V., Belenky A.M. Pirometallurgicheskoe rafinirovaniye tellura [Pyrometallurgical refining of tellurium]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 510, pp. 80–85.
9. Yi J., Cheng K., Zha G. An innovative green process for separating and enriching tellurium from lead anode slime via vacuum gasification. *Journal of materials research and technology*, 2022, vol. 16, pp. 599–607.
10. Mochalov L., Logunov A., Vorotyntsev A. Purification of tellurium through thermal decomposition of the plasma prepared tellurium hydride. *Separation and Purification Technology*, 2018, vol. 204, pp. 276–280.
11. Bratkov I.V., Yudina T.F., Melnikov A.G., Bratkov A.V. Poluchenie i svoystva kompozitsionnykh jelektrohimicheskikh pokrytij s jelektrohimicheski dispergirovannym grafenom na osnove nikel'evoy matricy [Production and properties of composite electrochemical coatings with electrochemically dispersed graphene based on nickel matrix]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2020, vol. 63, no. 8, pp. 90–95.
12. Vinokurov E.G., Margolin L.N., Farafonov V.V. Jelektroosazhdenie kompozitsionnykh pokrytij [Electrodeposition of composite coatings]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2020, vol. 63, no. 8, pp. 4–38.
13. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Bratkov I.V., Ershova T.V., Dontsov M.G. Aktualnye metody jelektrohimicheskoy obrabotki poverhnosti [Actual methods of electrochemical surface treatment]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2023, vol. 66, no. 7, pp. 151–158.
14. Gaydukova A.M., Pokhvalitova A.A., Konkova T.V., Stoyanova A.D. Vliyanie solesoderzhanija na jeffektivnost ochistki stochnykh vod ot ionov zheleza (III) jelektroflotosorbcionnym metodom [The effect of salinity on the efficiency of wastewater treatment from iron (III) ions by electroflotosorption method]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2022, vol. 65, no. 11, pp. 119–125.

15. Kireev S.Yu., Kireeva S.N. Jelektroosazhdenie indija iz sulfatnogo jelektrolita s galogenid-anionami [Electrodeposition of indium from a sulfate electrolyte with halide anions]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 65–71.

16. Shekhanov R.F., Gridchin S.N., Balmasov A.V., Mokretsov N.E. Oksalatno-ammonijnye jelektrolity dlja jelektroosazhdenija splavov cink-zhelezo [Ammonium oxalate electrolytes for electrodeposition of zinc-iron alloys]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 72–77.

17. Larionova M.P., Solovieva N.D., Savelieva E.A. Jelektroosazhdenie medi v ultrazvukovom pole iz otrabotannyh travilnyh rastvorov [Electrodeposition of copper in ultrasonic field from spent etching solutions]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2020, vol. 63, no. 11, pp. 71–76.

18. Mirzoeva A.A., Agaeva S.A. Jelektroliticheskoe otdelenie selena ot primesej tellura pri pererabotke shlamov himicheskogo kombinata [Electrolytic separation of selenium from tellurium impurities during processing of chemical plant sludge]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2015, vol. 58, no. 8, pp. 54–57.

19. Cook D.A., Reeves S.J., Zhang W. Tellurium electrodeposition from tellurium (II) and (IV) chloride salts in dichloromethane. *Electrochimica Acta*, 2023, vol. 456, 142456.

20. Likrizon E.V., Dikuser G.K., Silkin S.A., Dikuser A.I. Vysokoskorostnoe anodnoe rastvorenje hromonikelevoj stali v nitratnom rastvore pri termokineticheskoj neustojchivosti oksidnoj plenki [High-speed anodic dissolution of chromium-nickel steel in nitrate solution with thermokinetic instability of the oxide film]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2022, vol. 65, no. 8, pp. 77–84.

21. Belova V.S., Balmasov A.V. Jeletrohimicheskoe povedenie serebra v hloridsoderzhashhih rastvorah pri ciklicheskoj poljarizacii [Electrochemical behavior of silver in chloride-containing solutions at cyclic polarization]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2021, vol. 64, no. 11, pp. 50–56.

22. Lebed A.B., Naboychenko S.S., Shunin V.A. Proizvodstvo selena i tellura na OAO «Uraljelektromed» [Production of selenium and tellurium at Uralelectromed JSC]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta, 2015, pp. 112.

23. Patent № 2817809, Rossijskaja Federacija, SPK C25C 5/02; C01B 19/02; C22B 61/00; C22B 9/226. Sposob jelektroliticheskogo rafinirovanija chernovogo tellura [Method of electrolytic refining of rough tellurium] № 2023111540, zajavl. 02.05.2023, opubl. 22.04.2024, Timofeev K.L., Voinkov R.S., Shunin V.A., Malcev G.I., Novokshanova V.N., Mezhogskikh V.V., pp. 9.

24. Mastjugin S.A., Volkova N.A., Naboichenko S.S. [Sludge of electrolytic refining of copper and nickel]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta, 2013, 257 p.

25. V.V. Mezhogskikh, V.N. Novokshanova, R.S. Voinkov, V.A. Shunin, Jelektroliticheskoe rafinirovanie chernovogo tellura [Electrolytic purification of rough tellurium]. *Sovremennye tehnologii proizvodstva cvetnyh metallov: Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvjashhennoj pamjati S.S. Na-*

bojchenko, Uralskij federalnyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Elcina, 2023, pp. 80-86.

26. GOST 17614-2018. Tellur tehničeskij. Tehničeskie uslovija [Technical tellurium. Technical specifications]. Mezhgosudarstvennyj Sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii, Standartinform, 2018, pp. 12.

Об авторах

Межогских Валентин Васильевич (Верхняя Пышма, Российская Федерация) – ведущий инженер-технолог Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь» (624091, г. Верхняя Пышма, Успенский пр., 1; e-mail: mevv@uralcopper.com).

Шунин Владимир Александрович (Верхняя Пышма, Российская Федерация) – главный специалист Технического отдела Инженерно-производственного управления АО «Уралэлектромедь» (624091, г. Верхняя Пышма, Успенский пр., 1; e-mail: V.Shunin@uralcopper.com).

Тимофеев Константин Леонидович (Верхняя Пышма, Российская Федерация) – доктор технических наук, начальник технического отдела Инженерно-производственного управления АО «Уралэлектромедь» (624091, г. Верхняя Пышма, Успенский пр., 1; e-mail: K.Timofeev@uralcopper.com).

Воинков Роман Сергеевич (Верхняя Пышма, Российская Федерация) – кандидат технических наук, начальник Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь» (624091, г. Верхняя Пышма, Успенский пр., 1, e-mail: R.Voinkov@uralcopper.com).

Лобанов Владимир Геннадьевич (Екатеринбург, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов «УрФУ им. Б.Н. Ельцина» (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; e-mail: v.g.lobanov@urfu.ru).

About the authors

Valentin V. Mezhogskikh (Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation) – Leading Technological Engineer of Uralelectromed JSC Research Center (1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma, 624091; e-mail: mevv@uralcopper.com).

Vladimir A. Shunin (Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation) – Chief Specialist of the Technical Department of the Engineering and Production Department of Uralelectromed JSC (1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma, 624091; e-mail: V.Shunin@uralcopper.com).

Konstantin L. Timofeev (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Technical Department of the Engineering and Production Department of Uralelectromed JSC (1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma, 624091; e-mail: K.Timofeev@uralcopper.com).

Roman S. Voinkov (Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Head of the Research Center of JSC Uralelectromed (1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma, 624091; e-mail: R.Voinkov@uralcopper.com).

Vladimir G. Lobanov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals of the Ural Federal University named after B.N. Yeltsin (17, Mira St., Yekaterinburg, 620062, e-mail: v.g.lobanov@urfu.ru).

Поступила: 07.04.2025

Одобрена: 14.04.2025

Принята к публикации: 12.05.2025

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Очистка черного теллура электролитическим рафинированием / В.В. Межогских, В.А. Шунин, К.Л. Тимофеев, Р.С. Воинков, В.Г. Лобанов // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2025. – № 2. – С. 149–163.

Please cite this article in English as:

Mezhogskikh V.V., Shunin V.A., Timofeev K.L., Voinkov R.S., Lobanov V.G. Purification of rough tellurium by electrolytic refining. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2025, no. 2, pp. 149-163 (*In Russ*).