

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ Е-ОТХОДОВ

¹Жолдасбай Е.Е., ²Аргын А.А., ²Курмансейтов М.Б., ²Тажиев Е.Б., ¹Ичев В.А.

¹Жезказганский университет имени О.А. Байконурова, Жезказган;

²Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, Алматы, e-mail: argynaidar@gmail.com

В работе рассмотрены современные подходы к переработке электронных отходов (Е-отходов). Показаны пути переработки Е-отходов с использованием пиро-, гидро- и биометаллургических технологий, успешно применяемых на практике. Освещены принципиальные достоинства и недостатки известных в научной литературе технологий. На основании сравнительного анализа технологий, применяемых в зарубежных странах и в России для переработки Е-отходов, показано, что подходы к переработке имеют общий характер и в основном направлены на извлечение золота. На основании анализа проблем технологического и экологического характера показано, что в широко распространенных пирометаллургических процессах не уделяется должного внимания вопросам полноты обезвреживания опасных токсичных и вредных веществ при переработке Е-отходов. Слабо решены вопросы комплексного извлечения ценных металлов, в частности редких и редкоземельных металлов. В условиях нарастания жестких требований, предъявляемых к защите окружающей среды, действующие предприятия по переработке Е-отходов должны существенно модернизироваться либо прекратить свое существование. Показано, что при разработке новых технологий во главу угла должны ставиться вопросы охраны окружающей среды и безопасное обеспечение здоровья людей. Необходимо предусматривать мероприятия, направленные на экологизацию технологий. В рассматриваемом ракурсе изыскание новых решений в направлении совершенствования существующих и создания новых технологий для переработки Е-отходов приобретает особую значимость. Важность расширения научных исследований усиливается значительным ростом объемов Е-отходов, накопление которых может нанести колоссальный экологический ущерб.

Ключевые слова: Е-отходы, переработка, экология, технология, драгоценные металлы, комплексное извлечение, вредные вещества, окружающая среда

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2023–2025 гг. по приоритетному направлению «Рациональное использование водных ресурсов, животного и растительного мира, экология» проекта AP19576638 «Разработка инновационной технологии утилизации накопленных отходов Е-лома с получением чистого золота и цветных металлов».

ON THE ISSUE OF CHOOSING A TECHNOLOGY FOR PROCESSING E-WASTE

¹Zholdasbay E.E., ²Argyn A.A., ²Kurmanseytov M.B., ²Tazhiev E.B., ¹Ichev V.A.

¹Zhezkazgan University named after O.A. Baykonurov, Zhezkazgan;

²Satbaev University, Almaty, e-mail: argynaidar@gmail.com

The paper considers modern approaches to the processing of electronic waste (E-waste). The ways of processing E-waste using pyro-, hydro- and biometallurgical technologies successfully applied in practice are shown. The principal advantages and disadvantages of the technologies known in the scientific literature are highlighted. Based on a comparative analysis of technologies used in foreign countries and in Russia for the processing of E-waste, it is shown that the approaches to processing are of a general nature and are mainly aimed at extracting gold. Based on the analysis of technological and environmental problems, it is shown that in widespread pyrometallurgical processes, due attention is not paid to the issues of completeness of neutralization of dangerous toxic and harmful substances during the processing of E-waste. The issues of complex extraction of valuable metals, in particular, rare and rare earth metals, have been poorly resolved. In the conditions of increasing stringent requirements imposed on the environment, existing E-waste processing enterprises must be significantly modernized or cease to exist. It is shown that when developing new technologies, the issues of environmental protection and safe provision of human health should be put at the forefront. It is necessary to provide for measures aimed at the greening of technologies. In this perspective, the search for new solutions in the direction of improving existing and creating new technologies for the processing of E-waste are of particular importance. The importance of expanding scientific research is reinforced by a significant increase in the volume of E-waste, the accumulation of which can cause enormous environmental damage.

Keywords: E-waste, recycling, ecology, technology, precious metals, complex extraction, harmful substances, environment

The research was carried out within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for 2023–2025, in the priority area “Rational use of water resources, flora and fauna, ecology” of the project AP19576638 “Development of an innovative technology for the disposal of accumulated E-scrap waste to produce pure gold and non-ferrous metals.”

Объемы образования электронных отходов (Е-отходы), представляющие собой отработавшее электротехническое и электронное оборудование (ЭЭО), увеличиваются тревожными темпами. За последние пять лет их объем увеличился на 21%. По результатам Глобального мониторинга электронных отходов, проведенного в 2017 г., было собрано и переработано всего лишь 17,4% [1, с. 14–24].

Экспертами подсчитано [2, 3], что каждый житель планеты ежегодно генерирует в среднем около 7 кг электронного лома. По прогнозам, к 2030 г. масса накопленных Е-отходов в мире увеличится и достигнет почти 75 млн. т [4].

Е-отходы включают широкий спектр выброшенных электронных продуктов, включая компьютеры, мобильные телефоны, видеоплееры, принтеры, микроволновые печи, холодильники и морозильники. Электронные отходы составляют почти 2% от общего количества твердых отходов и содержат 70% токсичных материалов [2], включая Be, Cd и Pb, которые попадают на свалки. При неправильной утилизации (сжигании) Е-отходов в окружающую среду выделяются пары тяжелых металлов и токсичные газы. С другой стороны, Е-отходы содержат значительное количество драгоценных металлов, в частности золота. Содержание золота в мобильных телефонах может достигать 300–350 г/т и 200–250 г/т в компьютерных платах, что намного превышает его содержание в большинстве первичных золотосодержащих руд [3]. Переработка Е-отходов может стать важным источником для извлечения и цветных металлов: Cu, Zn, Ag, Pb и др. [5, 6]. Несмотря на этот потенциал, около 80% Е-отходов напрямую выбрасывается на свалки, поскольку применяемые методы их переработки недостаточно эффективны и сопровождаются большими затратами.

Учитывая обширный материал, имеющийся в научной литературе по состоянию сбора и предотвращения накопления Е-отходов и их влияния на окружающую среду, не вдаваясь в подробности статистики, в настоящей статье хотелось бы акцентировать внимание на проблемах утилизации Е-отходов, которая сегодня становится неизбежной и пока нерешаемой.

Цель работы – проведение литературного анализа способов переработки Е-отходов в мире и России.

Технологии переработки Е-отходов

Для переработки Е-отходов применяются *пиро-, гидро- и биогидрометаллургические* технологии. Перечисленные техно-

логии обычно включают проведение операций дробления и измельчения отходов до частиц размером 100–300 мкм с просеиванием и последующим физическим разделением пластмасс, когда это возможно. Однако последнее не всегда возможно, потому что металлические части заделаны в пластик в гораздо меньшем масштабе (несколько мкм).

В *пирометаллургических* технологиях измельченные отходы, содержащие золото, загружаются непосредственно при повышенных температурах для выгорания органических компонентов в плавильную печь на ванну жидкой меди. В результате все тяжелые металлы (Cu, Pb, Bi, Sb и др.), включая драгоценные металлы (Au, Ag и Pt), коллектируются в жидкой фазе расплавленной меди. Все остальные металлы переходят в шлак. Восстановление драгоценных металлов происходит при рафинировании меди с помощью электролиза [7, 8]. Пирометаллургические технологии имеют два преимущества: (1) все драгоценные металлы в конечном итоге извлекаются максимально, даже если их содержание составляет всего 1 ppm, и (2) не требуется специальной подготовки Е-отходов для плавки. Однако для организации пирометаллургической технологии переработки Е-отходов требуется завод по плавке металлов, обычно медеплавильный, реже свинцовый завод. Это сдерживает возможность организации такого производства: оно может создаваться в немногих местах. При этом электротехническое оборудование для Е-отходов должно собираться и транспортироваться на очень большие расстояния. С учетом того, что более 99,9% электронных отходов имеют низкую коммерческую ценность, стоимость извлечения золота с использованием пирометаллургической технологии достаточно высока.

Гидрометаллургические технологии [2, 7, 9] основаны на последовательности процедур кислотного и основного выщелачивания для отделения золота от других металлов с проведением последующих процедур разделения и очистки. Гидрометаллургические технологии получили широкое развитие во всем мире. Ввиду большой эффективности значительная часть золота извлекается этим методом. К недостаткам технологии можно отнести использование больших количеств опасных химических веществ, таких как цианид или тиомочевина. Есть две основные причины, которые сдерживают применение гидрометаллургии для извлечения золота из Е-отходов: (1) гидрометаллургические процессы сильно оптимизированы для определенного типа

Е-отходов. При этом извлечение золота из Е-отходов, где его содержание в них варьируется, сильно зависит от типа предварительной обработки и часто требует очень тонкого помола (< 100 мкм). В результате степень извлечения золота меняется от партии к партии; (2) в результате гидрометаллургических процессов образуются огромные количества высокотоксичных жидких отходов. Растущие требования к переработке отходов делают конкурентоспособными только очень крупные гидрометаллургические заводы, в результате чего затраты на сбор и транспортировку отходов становятся очень значительными, подобно пирометаллургическим методам.

Биогидрометаллургия основана на биокислении и биосорбции, основанных на протекании реакций с участием бактерий. Обычно технология используется для руд с большим содержанием сульфидов («упорных» руд), непригодных для цианида или тиомочевины. Технология имеет относительно низкую стоимость и сводит к минимуму количество химического или биологического осадка [9]. Однако процессы биогидрометаллургии плохо приспособлены для обработки Е-отходов, так как в электронных отходах золото представлено в основном в форме сплавов и в виде поверхностных покрытий. Из таких материалов бактерии не могут эффективно перевести золото в жидкую фазу.

В мировой практике для переработки Е-отходов широкое применение получают пирометаллургические технологии. В настоящее время основной формой, которую принимают металлы в современной электронике и бытовой технике, являются печатные платы (printed circuit boards, PCB). Печатные платы обеспечивают электрическое соединение между отдельными компонентами монтируемых модулей и находят применение почти во всех электронных и электрических приборах. Это могут быть как материнские платы, сетевые платы, звуковые платы для персональных компьютеров, так и платы управления бытовой техникой. Лом печатных плат (wasted printed circuit boards, WPCB, scrap PCB) является основной формой вторичных металлов, которые содержатся в электронике и бытовой технике, утратившей свои потребительские свойства. Лом печатных плат является крупным источником сырья для пирометаллургической их переработки на таких европейских и японских медеплавильных заводах, как Hoboken (входит в группу Umicore), Ronskar (входит в группу Boliden), Lunen (входит в группу Aurubis, Болгария), Kosaka (входит в группу Dowa) [10]. Кроме этого,

существует огромный неформальный сектор пирометаллургической переработки лома печатных плат в КНР (г. Гуйю) и республике Гана.

Переработка Е-отходов в России

В России ежегодно образуется около 1,5 млн т электронного лома, что составляет около 5% от общемировых объемов. Основная масса «утилизируется» на мусорных свалках, что приводит к неизбежному загрязнению окружающей среды. На полигонах с ЭО фиксируют высокие значения соединений брома, фталатов, пластификаторов, очень опасны соединения ртути, особенно легко проникающей в почву и грунтовые воды [11].

У людей и животных из неблагоприятных районов могут развиваться злокачественные новообразования, патологии легких, сердечно-сосудистые заболевания. Ртуть способна повредить нервную систему [11].

Вред здоровью причиняет прямой контакт со свинцом, кадмием, хромом, бромированными огнестойкими добавками, полихлорированными дифенилами (ПХД), вдыхание ядовитых паров, а также накопление химических веществ в воде и продуктах питания [11].

В Федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО) электронный лом представлен в четвертом блоке, в разделе «Отходы машин и прочего оборудования».

Е-отходы дифференцированы на две группы с учетом принадлежности к классу оборудования: (1) компьютерная техника, электронные компоненты, периферийное оборудование, устройства для измерений и навигации, медицинская техника, оптика, фотоаппараты, аудио- и видеоаппаратура, игровые приставки, телефоны, антенны, носители информации, банкоматы, и т.д. и (2) электрическое оборудование: электродвигатели, аккумуляторы, кабели, бытовая техника, кондиционеры, холодильники, прочие устройства [11].

Основная масса отходов электроники и электротехнического оборудования относится к малоопасному 4 классу опасности для окружающей среды. Исключение – некоторые виды картриджей, мобильные телефоны, таможенные устройства (3 класс – умеренно опасные), источники бесперебойного питания – 2 класс (высокоопасные) [11].

В России, как и в большинстве зарубежных стран, предпочтение отдано пирометаллургическим технологиям переработки Е-отходов. Критический анализ по состоянию Е-отходов и их переработке приведен в работах [12–14].

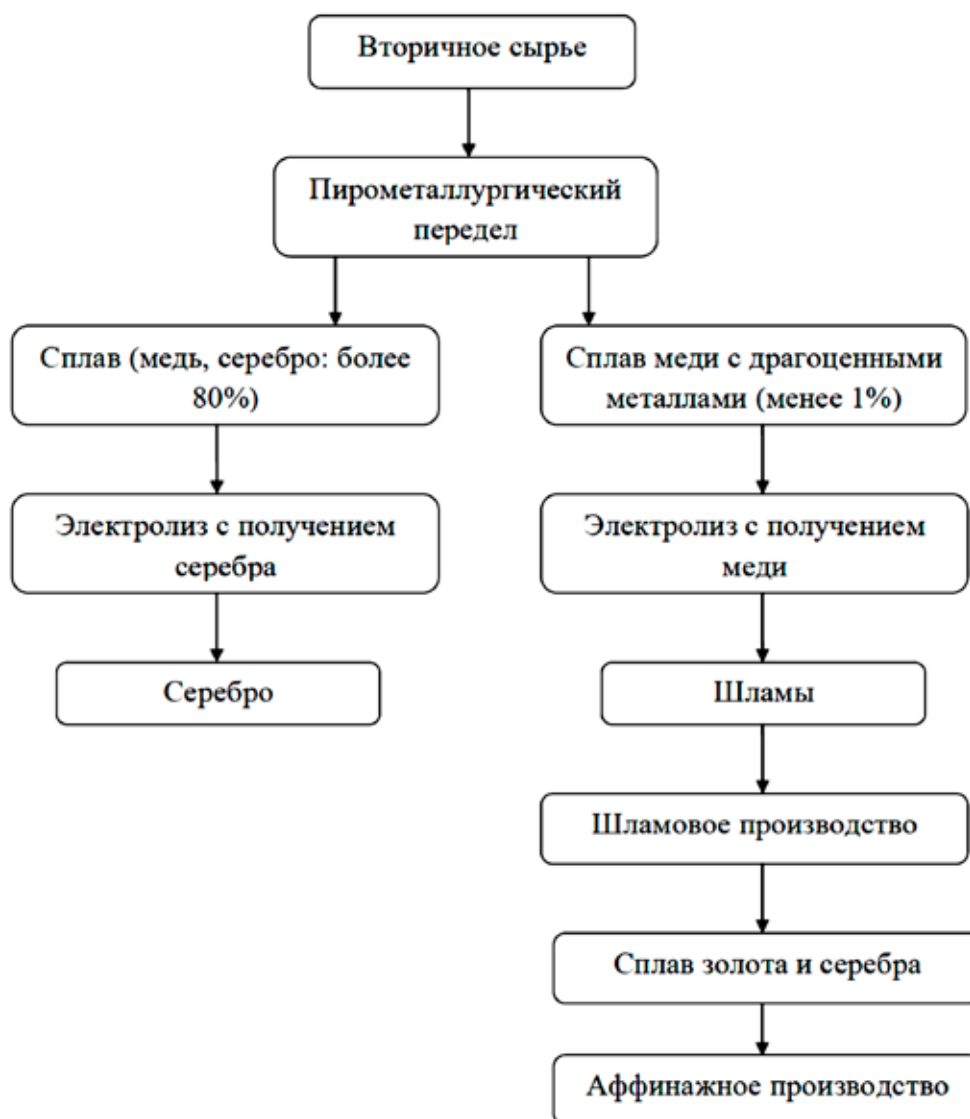
Пирометаллургический передел, распространенный в России, включает элек-

тродуговую и анодную плавки либо отражательную и шахтную плавку с последующим конвертированием и огневым рафинированием. Наиболее приемлемый способ переработки определяют в зависимости от типа электронных отходов и их вещественного состава. Переработка вторичного сырья в РФ в большинстве своем ориентирована на медеплавильные комбинаты и сводится к преобразованию электронного лома, содержащего благородные металлы, в сплав с медью. Далее черновая медь подвергается электролитическому растворению анодов, в процессе которого образуется анодный шлак, обогащенный драгоценными металлами [14].

Принципиальная схема переработки E-отходов в России для действующих

предприятий не различается по своей сути и в общем виде выглядит, как показано на рисунке.

Россия на сегодняшний день генерирует всего лишь 3,75% мирового объема электронных отходов, но эта сфера постепенно развивается и становится выгодной. Внедрение эффективных технологий в России сдерживается тем, что крупные металлургические предприятия цветной металлургии нацелены на получение исключительно драгметаллов. Для улучшения экономических показателей предприятий и получения ими максимальной прибыли необходимо внедрять технологии комплексной переработки, направленные на извлечение не только благородных металлов, но и широкого спектра других ценных металлов [11].



Принципиальная схема переработки электронного лома в России [14]

Из приведенного анализа следует, что ни одна из рассмотренных технологий, направленных на переработку E-отходов, не решает в полной мере как технологические, так и экологические проблемы. Технологии построены так, что в основном направлены на извлечение золота. Причем для извлечения золота необходимо проведение последовательных сложных операций, от деятельности которых наносится большой вред окружающей среде.

Ни в одной из используемых технологий, как в зарубежных странах, так и в России не рассматриваются и даже не ставятся вопросы полноты обезвреживания опасных для здоровья и окружающей среды токсичных веществ и вредных металлов. За исключением извлечения драгоценных металлов не уделяется должного внимания и комплексному извлечению других ценных металлов, например редких и редкоземельных. В условиях жестких требований к экологии существующие технологии должны быть серьезно модифицированы или прекратить свою деятельность. Это требует изыскания новых научных подходов, разработки инновационных технологий для переработки E-отходов, которые уже в ближайшее время могут стать стабильным дополнительным вторичным сырьем для производства драгоценных и других сопутствующих ценных металлов. При этом любая новая технология должна обеспечивать минимальный выброс токсичных и вредных веществ в окружающую среду.

Экономические показатели производства по переработке E-отходов в целом определяются рядом факторов, в частности: эффективностью применяемых технологий на всех стадиях технологического цикла переработки; качеством сортировки лома по группам; рациональной загрузкой основного и вспомогательного технологического оборудования и т.д. Лишь при оптимальном сочетании указанных факторов может быть реализовано экономически эффективное производство [14].

Заключение

На территории Казахстана, к сожалению, технологии по переработке E-отходов отсутствуют, хотя накопленные их объемы за последние годы очень значительны и продолжают нарастать. Актуальность и значимость сбора и переработки E-отходов усиливается с фактом отсутствия национальной технологии их переработки. Многие ценные, технологически возвращаемые металлы безвозвратно теряются. E-отходы представляют собой сложный конгломерат сплавов ценных металлов, свойства ко-

торых зависят от вида их использования, конструкции электротоваров (электронные платы, смартфоны) и многих других факторов. Это определяет необходимость проведения комплексных исследований состава и свойств E-отходов с целью использования их в качестве дополнительного источника сырья для извлечения золота и ценных металлов в виде товарных продуктов.

Авторами настоящей работы ведутся системные исследования по разработке новой технологии для переработки различного по типу и составу E-отходов, в корне отличающейся от существующих технологий. Ключевым ядром технологии является полное обезвреживание опасных веществ и вредных металлов на начальной стадии технологии и обеспечение комплексной переработки исходного сырья. Предусмотренная по технологии предварительная качественная оценка исходных материалов обеспечивает выбор и оперативный контроль оптимальных параметров последующих операций, составляющих общую концепцию технологии.

Предварительные положительные результаты, полученные применительно к переработке различных E-отходов (компьютерные платы, ноутбуки, смартфоны), показали высокие значения по извлечению золота, меди и ряда других драгоценных металлов в товарные продукты. Полные данные проведенных исследований будут опубликованы в ближайшее время в научных изданиях после защиты интеллектуальной собственности.

Список литературы

1. Балде К.П., Форти В., Грей В., Кюп Р., Стергманн П. Глобальный мониторинг электронных отходов. Университет Организации Объединенных Наций (УООН), Международный союз электросвязи (МСЭ) и Международная ассоциация по твердым отходам (МАТО). Бонн – Женева – Вена, 2017. 109 с.
2. Gadekar J. Extraction of Gold and other Precious Metals from e-waste // International Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Research. 2017. Vol. 1. P. 24–34.
3. Hagelken C. and Corti C. Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through 'Design for Recycling' // Gold Bulletin. 2010. Vol. 43 (3). P. 209–220.
4. Blake V., Farrelly T., Hannon J. "Is Voluntary Product Stewardship for E-Waste" Working in New Zealand? A Whangarei Case Study" // Sustainability (Switzerland). 2019. Vol. 11. P. 1–26. DOI: 10.3390/su11113063.
5. Kaya M. Recovery of Metals from Electronic Waste by Physical and Chemical Recycling Processes // International Journal of Chemical and Molecular Engineering. 2016. Vol.10 (2). P. 259–270.
6. Khaliq A. et al. Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective // Resources. 2014. Vol. 3. P. 152–179.
7. Al Balushi M., Kaithari D.K. Recovery of Gold from e-waste // International Journal of Students' Research In Technology & Management. 2016. Vol. 4 (3). P. 44–48.

8. Cui J., Zhang L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 158. P. 228–256.
9. Kim Y., Seo H., Roh Y. Metal Recovery from the Mobile Phone Waste by Chemical and Biological Treatments // *Minerals*. 2018. Vol. 8 (8). P. 1–10.
10. Shengen Zhang, Yunji Ding, BoLiu, De'anPan, Chein-chiChang, Volinsky A.A. Challenges in legislation, recycling system and technical system of waste electrical and electronic equipment in China // *Waste Management*. 2015. № 45. С. 361–373.
11. Электронные отходы: проблемы для окружающей среды и способы утилизации [Электронный ресурс]. URL: <https://recycle.net/othody/vidy/elektronnye-problemy-dlya-okruzhayushhej-sredy-i-sposoby-utilizatsii> (дата обращения: 20.06.2023).
12. Максимова М.А. Анализ состояния переработки электронного лома в России // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН*. 2016. № 3 (56). С. 102–111.
13. Леонтьев Л.И., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В. Анализ? переработка и использование техногенных отходов металлургического производства // *Комплексное использование минерального сырья*. 2014. № 4. С. 8–25.
14. Лолейт С.И. Разработка экологически чистых технологий комплексного извлечения благородных и цветных металлов из электронного лома: спец. 05.16.02 «Металлургия черных и цветных металлов»; дис. ... докт. техн. наук. Нац. исслед. технолог. ун-т «МИСиС». Москва, 2010. 245 с.