

## Перспективы повторного использования и безопасной утилизации металлосодержащих отходов (обзор)

© 2021. Д. О. Лемешев, к. т. н., доцент, декан, А. С. Протасов, аспирант, В. А. Колесников, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, 125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, e-mail: protasov@muctr.ru, diolem@muctr.ru

Целью обзора является обобщение новейших тенденций в области переработки металлосодержащих отходов, прежде всего, отходов гальванического производства и выявление проблем, которые возникают при разработке методов регенерации ценных и утилизации опасных компонентов.

Многие виды металлосодержащих отходов такие, как гальваносток, шахтный дренаж, отходы металлообработки, металлургического производства и др., до недавнего времени относили к так называемым трудноизвлекаемым отходам, и они подлежали в лучшем случае захоронению на полигонах, что, помимо экономической нецелесообразности, является мощным фактором загрязнения окружающей среды. В настоящее время широко ведутся разработки по максимально полному извлечению ценных компонентов, вторичному использованию и безопасному захоронению опасных веществ.

В работе рассмотрены применяемые и разрабатываемые в настоящее время способы максимального извлечения ценных металлов из отходов, их достоинства и недостатки. Оценена возможность унификации применяемых методов многокомпонентных и смешанных отходов. Уделено внимание перспективам применения шламов в качестве добавок в различные материалы хозяйственного назначения. При этом рассмотрены как влияние вводимых добавок на физико-механические свойства конечного продукта, так и на степень инертности опасных веществ, экологическая безопасность материалов.

Освещены проблемы иммобилизации металлов в матрице основного материала, связанные с особенностями химического и фазового состава, геохимического распределения элементов, процессов, происходящих при высокотемпературной обработке при получении целевого продукта.

В настоящее время исследования по обезвреживанию отходов сводятся, как правило, к рассмотрению побочных продуктов одного предприятия или технологии, содержащей строго ограниченный набор извлекаемых и/или утилизируемых компонентов. Создание централизованных заводов по переработке металлосодержащих отходов позволит существенно увеличить их рентабельность, но значительно осложняет протяжённость технологической цепочки. Знание современных существующих и развивающихся методов в этой области способствует созданию наиболее эффективных технологий.

**Ключевые слова:** металлосодержащие отходы, гальваношламы, утилизация, высокотемпературные материалы, обезвреживание.

## Modern methods of recovery, reuse and safe disposal of hazardous metal-containing waste

© 2021. D. O. Lemeshev ORCID: 0000-0001-5645-1909

A. S. Protasov ORCID: 0000-0003-1877-5034

V. A. Kolesnikov ORCID: 0000-0002-3965-4728

D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology,  
9, Miusskaya Square, Moscow, Russia, 125047,  
e-mail: protasov@muctr.ru

The purpose of this review is to summarize the latest trends in the processing of metal-containing waste, primarily waste from galvanic production, and to identify the problems that researchers face in the development of methods for the recovery of valuable and disposal of hazardous components.

Many types of metal-containing waste, such as galvanic waste, mine drainage, metalworking waste, metallurgical waste, etc. used to be classified as hard-to-recover waste and, at best, were subject to burial at landfills, which, in addition to economic inexpediency, is a powerful factor of environmental pollution. The development of the most complete recovery of valuable components, reuse and safe disposal of hazardous substances is currently under way.

The paper discusses the currently used and developed methods for the maximum extraction of valuable metals from waste, their advantages and disadvantages. The possibility of unification of the applied methods of multicomponent and mixed waste is evaluated.

Attention is paid to the use of sludge as additives in various materials for household purposes. At the same time, both the influence of the introduced additives on the physical and mechanical properties of the final product and the degree of inertization of hazardous substances and the environmental safety of materials are considered.

The problems of immobilization of metals in the matrix of the base material, associated with the peculiarities of the chemical and phase composition, the geochemical distribution of elements, the processes occurring during high-temperature processing in the process of obtaining the target product are highlighted.

**Keywords:** metal-containing waste, galvanic sludge, disposal, high-temperature materials, neutralization.

В настоящее время исследования в области нейтрализации отходов обычно ограничиваются рассмотрением технологии или побочных продуктов одного завода, содержащих строго ограниченный набор восстанавливаемых и/или перерабатываемых компонентов. Создание централизованных заводов по переработке металлосодержащих отходов значительно повысило бы их рентабельность, но значительно усложнило бы длину технологической цепочки. Знание существующих и развивающихся методов в этой области способствует созданию наиболее эффективных технологий.

Экспоненциальный рост численности населения земного шара, возрастающие потребности людей и одновременно с тем истощающиеся минеральные ресурсы заставляют всё чаще задумываться об экологической ситуации в мире.

Развитие промышленных предприятий и наращивание темпов производства приводит к тому, что с каждым годом количество невозвратных отходов увеличивается в разы, а, с другой стороны, быстрая индустриализация увеличивает спрос на тяжёлые, цветные и ценные металлы. В связи с этим остро встаёт вопрос изучения альтернативных источников металлов, в том числе способы максимально эффективного использования промышленных отходов, содержащих ценные компоненты, повторное их использование, восстановление и переработка.

В Российской Федерации утверждён Федеральный классификационный каталог отходов, в котором выделены девять блоков, разделённых по областям происхождения отходов. Отходы можно классифицировать по различным признакам: по агрегатному состоянию, по степени токсичности, по фазовому составу и др. Виды отходов, включающие в себя тяжёлые и цветные металлы – это нефтяные катализаторы, медицинские отходы, отходы производства электронных изделий, отработанные аккумуляторы, отходы металлообрабатывающей промышленно-

сти, летучая зола металлургических заводов, предприятий по производству удобрений, химической, лекарственной и красильной продукции, гальванических производств. Такие промышленные отходы содержат опасные элементы (Au, As, Pb, Ag, Ni, Mo, Co, Cu, Zn, Cr, радиоактивные элементы), неправильная утилизация которых приводит к негативным последствиям для человека и окружающей среды (ОС).

Изучение литературных источников показывает, что исследователи во всем мире успешно находят пути решения сложившейся ситуации. Однако свойства веществ очень многообразны, как и процессы, приводящие к изменениям этих свойств и структуры. Это накладывает множественные ограничения на применимость конкретных методов и методик, показывает практическую невозможность создания универсальной технологии переработки металлосодержащих отходов. Зачастую извлечение или обработка отходов для дальнейшего использования в своей стоимости превышает затраты на получение металлов или материалов из природного сырья.

Существует несколько принципиально разных способов обращения с металлосодержащими отходами. До недавнего времени большая часть их подлежала захоронению на полигонах. Главная причина такого подхода заключается в трудноизвлекаемости ценных компонентов и в экономической нецелесообразности. В связи с этим в настоящее время весьма перспективны исследования, направленные на разработку методов, позволяющих наиболее полно извлекать металлы, тем самым минимизируя неблагоприятное воздействие на ОС.

Целью обзора было обобщение новейших тенденций в области переработки металлосодержащих отходов, прежде всего, отходов гальванического производства и выявление проблем, которые возникают при разработке методов регенерации ценных и утилизации опасных компонентов.

**Методы извлечения металлов из отходов**

Методы утилизации или возврата в оборот металлосодержащих оксидных отходов условно можно классифицировать по принципу их использования: извлечение ценных компонентов; использование «как есть» в виде добавок к различным материалам, имеющим цель инертизации опасных веществ (ОВ) и использование продукта для хозяйственных нужд; совместное использование вышеперечисленных подходов.

Твёрдые металлургические отходы (шлаки, пыль и шламы) традиционно обрабатывают с помощью: пирометаллургии [1], гидрометаллургии [2], методов смешанного типа [3].

Пирометаллургический метод – это традиционный процесс, обычно включающий сжигание отходов, спекание и плавление при высоких температурах. Процесс извлечения облегчается добавлением углерода или любого углеродистого материала, такого как кокс. Методы термической обработки требуют больших затрат энергии, при этом выделяются загрязняющие вещества (ЗВ), что сопровождается потерями металла. Добавление извести и кокса может оказывать негативное влияние на ОС, но это сопоставимо с традиционной добычей металла [4].

Гидрометаллургия – это процесс извлечения металлов, включающий химические реакции, проводимые в водных или органических растворах [5]. Преимущества извлечения металлов этим способом – высокая степень извлечения и относительно низкое воздействие на ОС благодаря возможности контролировать процессы в широком диапазоне параметров, невысокие капитальные вложения и доступность для небольших предприятий. Типичными этапами этого процесса являются выщелачивание, концентрация/очистка и восстановление.

Методы основанные на механизме адсорбции, определяются физико-химическими свойствами адсорбента и тяжёлых металлов (ТМ) и условиями эксплуатации, т. е. температурой, количеством адсорбента, значением pH, временем адсорбции и начальной концентрацией ионов металлов [6]. Варианты сорбции на углеродных нанотрубках [7] показывают хорошие результаты, однако научных публикаций, в которых описывается количественная оценка, роль функциональных групп в сорбции ионов ТМ, недостаточно. В работе [8] приводятся данные по использованию биоорганического полимера хитозана, кото-

рый обладает уникальными свойствами, но низкой механической прочностью и плохой стабильностью, особенно в кислой среде. Для устранения недостатков используют химическую модификацию хитозана. Существует также опыт применения магнитных сорбентов (нацеленных на ферритмагнитные составы), биосорбентов, металлорганических структур.

Различные мембранные методы в настоящее время всё больше входят в практику очистки для удаления загрязняющих веществ из сточных и технологических вод. Варианты метода: нанофильтрация, ультрафильтрация, обратный осмос, прямой осмос, электродиализ [9].

Методы, основанные на электрохимическом окислении – восстановлении [10], применяются для выделения металлов с низким анодным потенциалом. Способ не отличается высокой универсальностью, так как эффективное извлечение металла возможно при подборе определённых характерных параметров и материала электрода, а выделение нескольких металлов делает процесс многостадийным.

Осаждение и коагуляция различных металлов, являясь также зависимым от многих параметров методами (произведение растворимости металла, pH среды, растворителя, осадителя), не могут быть универсальными и как вышеперечисленные способы применяется для стадийного фракционирования компонентов жидких или переведённых в раствор отходов [11].

Неизбежным негативным моментом в этих способах извлечения является то, что извлечение происходит не полностью, а побочными продуктами остаются технологические воды – истинные растворы ионов металлов и высокодисперсные взвеси нерастворимых гидроксидов, которые также требуют дальнейшей утилизации. Например, авторы работы по селективному извлечению Au, Ag, Cu и Zn из гальванических шламов двух ювелирных заводов с использованием смешанного процесса сульфатного обжига и выщелачивания тиосульфатом натрия показали, что наилучшие результаты по извлечению металлов составили: 78% для серебра, 77% для золота, 68% для меди, 49% для никеля и 73% для цинка [12]. Следует отметить весьма высокую степень извлечения ценных металлов без использования высокотоксичных цианидов, однако технологические воды всё ещё содержат ТМ и подлежат дальнейшему обезвреживанию и утилизации.

Эффективность и селективность экстракции пытаются повысить различными методами, например, биовыщелачиванием [13]. Относительно недавно в практику стала входить экстракция в совокупности с воздействием ультразвука [14], показана роль кавитации, индуцированной ультразвуком, которая влияет на химическую и физическую активность в системе твёрдое тело-жидкость.

Другой аспект большинства существующих технологий – избирательность методов [15, 16]. С одной стороны, это позволяет извлекать требуемый компонент и непосредственно направлять его на дальнейшую обработку, что является неоспоримым положительным моментом. С другой стороны, каждая технология разрабатывается с учётом элементарного и минералогического состава, что делает сложным или даже неосуществимым организацию централизованного перерабатывающего предприятия, способного универсально извлекать и утилизировать отходы сложного и тем более переменного состава. Это особенно актуально для относительно небольших предприятий, где затраты на переработку отходов могут значительно превосходить экономическую выгоду основного производства.

### Методы иммобилизации загрязняющих веществ

Принципиально отличная, широко исследуемая, но также сильно зависимая от исходного состава методология утилизации твёрдых оксидных отходов заключается в иммобилизации компонентов в прочной матрице основного состава с целью получения инертного материала, пригодного для безопасного захоронения или использования в хозяйственных целях.

Среди отходов особое место занимает гальванический шлам и осадки гальванических ванн. Этот тип отходов находится в лидерах по невозвратности. Часто содержание органических растворителей делает обезвреживание их ещё более трудоёмким. Статистически усреднённый состав гальваношламов по данным работы [17] продемонстрирован в таблице.

Инкапсуляцию ЗВ можно также условно разделить на высокотемпературные и низкотемпературные технологии.

Иммобилизация гальванического шлама, богатого хромом, в матрице сульфоалюминатного цемента была продемонстрирована в исследовании, где были показаны приемлемые прочностные характеристики получаемого ма-

териала, эффекты внедрения Cr(III) в структуру этtringита  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$  и высокую стойкость к выщелачиванию ионов трёхвалентного хрома [18]. Однако также было обнаружено, что окисление хрома до шестивалентного состояния способствует его вымыванию в окружающую среду, что, в свою очередь, накладывает определённые ограничения к условиям эксплуатации цемента.

Возможность применения отходов в цементной промышленности в качестве ускорителей твердения цементов показаны в работе [19]. В экспериментах использовали шлам, содержащий в основном большие количества оксида и гидроксида алюминия, что позволило повысить прочность цемента на 42%. В данном случае речь идёт не об обезвреживании отходов, а исключительно о вторичном использовании и, имея в виду экологические риски, авторы отмечают возможность использования разработанных ими методов лишь в случае высокой экономической эффективности.

В работе [20] исследована возможность получения покрытий смешением шлама с неионной асфальтовой эмульсией и последующее формирование вторичного асфальтового барьера с помощью быстро застывающей анионной асфальтовой эмульсии. Результаты стабилизации гальванических шламов с помощью асфальтовых эмульсий продемонстрировали преимущества данного вида стабилизации: высокую универсальность, основанную на способности создавать иммобилизирующий барьер против вымывания загрязнителей, возможность стабилизации влажных отходов, высокую гидрофобность асфальтового связующего, инертность и высокую стабильность в ОС. Экотоксичность материала была проверена на нескольких видах живых биологических объектов. Тесты показали, что стабилизация способствует снижению токсичности некоторых образцов более чем на два порядка [20].

Удержание традиционными керамическими глинами ионов Cu, Ni и Cr в условиях промышленного производства было исследовано в работе [21]. Было показано, что введение гальваношламов снижает механические и эксплуатационные характеристики керамической плитки. Установлено, что возможные механизмы стабилизации ионов металлов – макро- и микрокапсулирование, позволяющее инертнозировать металлы, однако разрушение изделий приводит к ускорению высвобождения ионов в ОС. Работа показывает неправомочность линейного масштабирования вполне

Таблица / Table

Концентрации элементов (в % от сухой массы) в осадках гальванических ванн [17]  
Element concentrations (% dry mass) in the sediments of electroplating baths [17]

Элемент Element	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Медиана Median	Среднее геометри- ческое Geometric mean	Стандартное геометрическое отклонение Geometric standard deviation	Коэффициент асимметрии Skewness	Количество шламов Number of sludges				всего total
							шахтный дренаж acid mine drainage	металло- обработка metalfinishing	пирометал- лургия pyrometal- lurgical	производство Zn Zinc production	
Al	0,00007	35,4	1,31°	0,938°	6,86	-1,17°	46	52	19	3	120
As	0,0002	15,9	0,030	0,054	36,7*	0,11	12	5	7	5	29
Ca	0,014	40,6	7,43°	4,51°	5,33	-1,37°	46	59	27	9	141
Cd	0,000004	9,02	0,012	0,010	34,8*	-0,44	21	13	9	10	53
Cl	0,0001	8,82	0,740°	0,463°	17,4*	-2,33°	1	11	1	0	13
Co	0,0002	3,10	0,013	0,020	19,3*	0,15	6	11	0	9	26
Cr	< 0,001	28,5	1,37°	0,737°	12,3*	-0,70°	6	60	2	1	69
Cu	0,0003	60,2	0,416°	0,253°	18,4*	-0,45°	41	63	7	9	120
Fe	0,002	74,0	7,71°	5,44°	6,37	-1,04°	46	70	21	13	150
K	< 0,0002	7,20	0,137	0,117	6,08	0,77	13	28	8	1	50
Mg	< 0,012	13,7	0,635	0,535	5,42	-0,79	44	30	21	8	103
Mn	0,001	27,9	0,155°	0,200°	9,06	0,58°	31	29	15	7	82
Na	0,002	9,57	0,568	0,456	4,95	-0,77	26	38	10	2	76
Ni	< 0,0005	36,0	0,500°	0,295°	14,9*	-0,56°	9	60	1	11	81
P	0,004	19,8	0,400	0,327	13,2*	-0,27	13	27	5	1	46
Pb	< 0,0002	16,2	0,080	0,086	14,9*	0,11	13	35	19	12	79
S	0,024	14,1	2,97°	2,20°	4,40	-0,83°	33	29	15	3	80
Si	0,001	39,8	0,868	0,809	6,25	-0,69	31	41	14	1	87
Sn	0,0007	3,76	0,660°	0,305°	5,88	-1,80°	1	16	7	1	25
Ti	0,003	3,54	0,035°	0,056°	5,09	0,96°	14	11	3	4	32
Zn	0,0003	55,7	1,99	1,46	10,0*	-0,99	44	67	26	13	150
Доля от общего числа источников (%) / Proportion of total sources (%)							32	47	14	7	100

успешных лабораторных условий на реальные производственные мощности [21].

Целью исследования работы [22] было изучение возможности применения стеклокерамических материалов из отходов содово-известкового стекла с добавлением гальванического шлама. В частности, была изучена экологическая совместимость стеклокерамических материалов для понимания происходящих явлений иммобилизации в исследуемой системе с целью переработки этих остатков экологически совместимым способом. Уделяется внимание влиянию пористости конечного материала и её влиянию на выщелачиваемость инкапсулированных ОВ, а также увеличению энергоэффективности высокотемпературных процессов [22]. Несмотря на хорошие результаты, полученные в результате исследований по обезвреживанию гальванических отходов, авторы справедливо предполагают, что данный метод пригоден для получения материала, предназначенного для дальнейшего захоронения на полигонах. Совершенствование метода позволило бы в будущем расширить области практического использования готового продукта [22].

Твёрдые отходы, содержащие большое количество  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые после спекания превращаются в алюмосиликатную систему, можно использовать для получения стеклокерамических пенопластов. Авторы обзора [23] обобщают существующие технологии, уделяя большое внимание разработке технологических параметров, а также влиянию керамической фазы, стеклофазы и пористости на удержание ионов металлов. Также в работе подчёркиваются теоретические аспекты физико-химических превращений, происходящих при высокотемпературной обработке сырья, влияющих на свойства отдельных фаз, распределение компонентов и как следствие иммобилизующую способность стеклокерамической матрицы в отношении ОВ. Описаны способы получения стеклокерамических пенопластов с заданными свойствами – звуко- и теплоизоляционными, прочностными характеристиками [23].

#### Методы оценки и проблемы инкапсуляции опасных веществ

Несмотря на большое количество работ, посвящённых иммобилизации ионов металлов в керамической матрице, количественная и систематическая оценка степени иммобилизации опасных элементов в процессе производства

силикатной керамики в прошлом проводилась редко, а большинство опубликованных работ в основном посвящены технологическим вопросам [24]. Как правило, силикатная керамика производится из натурального сырья, содержащего незначительные количества вредных веществ. Это послужило причиной того, что в мировой практике отсутствуют нормативные документы, регулирующие содержание в керамических изделиях металлов как источников опасности. Целью работы [24] было обобщение данных по содержанию вредных веществ в различной керамике, включая керамические пигменты, глазури и пр., унифицировать способы оценки возможного влияния опасных компонентов на ОС и рассчитывать их через экспериментально наблюдаемые параметры.

Степень выщелачивания оценивают как количество исследуемого элемента, перешедшего в раствор, отнесённое к общему количеству элемента в материале, выражают в долях или процентах. Данный параметр зависит от природы компонента, характера среды: химического состава, рН, условий проведения эксперимента (температура, время экспозиции). Поэтому параметры проведения стандартизируют, исходя из условий предполагаемого использования конкретного материала.

Для более детального рассмотрения негативного воздействия на ОС материалов и изделий, для стандартизации характеристик основного состава материала как средства иммобилизации потенциально ОВ рассматриваются параметры эффективности инертности: мобилизованная фракция, коэффициент опасности, эффективность иммобилизации [24].

Эффективность иммобилизации  $\varepsilon_{\text{HE}}$  (hazardous elements – опасные элементы) выражает процент данного ЗВ, который не мобилизуется во время испытания на выщелачивание керамической массы, содержащей отходы:

$$\varepsilon_{\text{HE}} = \frac{\xi_{\text{total}} - \xi_{\text{leached}}}{\xi_{\text{total}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\xi_{\text{total}}$  и  $\xi_{\text{leached}}$  – весовое содержание ОВ в основной массе и фильтрате, соответственно.

Мобилизованная фракция ( $f_{\text{HE}}$ ) – доля ОВ, которая может высвободиться, от общего количества ОВ:

$$f_{\text{HE}} = \frac{\xi_{\text{leached}}}{\xi_{\text{total}}}. \quad (2)$$

Коэффициент опасности ( $HQ_{HE}$ ) выражается следующим соотношением:

$$HQ_{HE} = \frac{\xi_{leached}}{\xi_{limit}}, \quad (3)$$

где  $\xi_{limit}$  – нормативный предел для инертного материала. Предельные значения выщелачивания опасных элементов уменьшаются в следующем ряду: Ba, Zn, Cu, Cr, Mo, As, Pb, Ni, Se, Sb, Cd и Hg (учитывая общепризнанные нормы) [24].

Фазы керамики рассматриваются как акцептор ионов металлов и определены степени встраивания в матрицу стеклофазы и в полиэдрические мотивы керамической фазы. Учитывается влияние факторов:

- окисляющая способность, так как ионы в различной степени окисления имеют разное сродство к матрице, а ионы металлов в высших степенях окисления имеют тенденцию к экстрагированию основаниями;

- значение pH среды, влияющее на выщелачиваемость;

- температура эксплуатации.

Рассмотрены [24] влияние обработки (температура и длительность), наличие пористости и распределение элементов в объёме, так как ионы, располагающиеся на границах раздела твёрдой фазы и жидкости, обладают различной активностью. Изучены геохимические особенности распределения ОВ. Так, например, коэффициенты разделения, полученные для системы шпинель/расплав, показывают сродство в следующем порядке: Cr, V, Zn, Ni, Mo, Cu, As и Pb, они обогащают кристаллическую фазу. Ионы Ba и Sb велики для размещения в кристаллической решётке шпинели и обогащают расплав. Для клинопироксена элементы Cr, Zn, Ni и V обогащают кристаллическую фазу, а Sb, As, Cu и Cd – расплав. Pb и Ba в этой системе распределяются практически равномерно.

В литературе описаны данные, согласно которым коэффициент опасности для Mo превышает пределы в 100% случаев, для Cr – в 30%, для As – в 28% и для Cu – в 12% случаев, что объясняется неполным синтезом керамической матрицы. Стоит упомянуть, что эти данные основаны на изучении литературных источников, касающихся силикатной керамики. Оксидная и фосфатная керамики в работе [24] не рассматривались.

Технология получения оксидного керамического материала из гальванических шламов недавно была предложена в Российском химико-технологическом университете им.

Д.И. Менделеева. Представлена многостадийная технологическая цепочка, включающая в себя флотационные, экстракционные, мембранные, электрохимические методы, позволяющие наиболее полно извлекать из шламов смешанного состава ценные элементы с получением влажных гидроксидов тяжёлых, цветных и чёрных металлов. Последняя стадия заключается в термическом удалении воды с последующим спеканием полученной смеси оксидов. В результате такой обработки могут быть получены гранулы, представляющие собой алюмосиликатную керамику, в структуре которой надёжно связаны различные компоненты первичных стоков. Полученный материал инертен к воздействию щелочей, кислот и растворителей и может использоваться в различных отраслях народного хозяйства [25].

### Заключение

Таким образом, решение вопросов возврата в производство, обезвреживания и утилизации твёрдых отходов полностью зависит от их начального состава и способа последующей обработки. Комбинируя различные методы, можно комплексно подойти к утилизации отходов различных классов, а также смешанных отходов.

Для реализации подобных проектов необходимы теоретические и экспериментальные исследования. Это позволит более эффективно проводить предварительные стадии утилизации, более полно извлекать ценные компоненты. Глубокое понимание физико-химических процессов является основой для создания методов высокой степени инертности неизвлекаемых компонентов с получением материалов пригодных для использования в хозяйственных нуждах.

В большинстве случаев, используя современные наработки, можно обеспечить полное обезвреживание и многократный возврат в производство ценных продуктов, которые сейчас утилизируют захоронением на полигонах.

### References

1. Bender O.W., Schroeter R.A., Garcia M.G., Szenté R.N. Treating electroplating residues with thermal plasmas // JOM. 1998. V. 50. No. 7. P. 32–35. doi: 10.1007/s11837-998-0190-0
2. Silva J.E., Soares D., Paiva A.P., Labrincha J.A., Castro F. Leaching behaviour of a galvanic sludge in sulphuric acid and ammoniacal media // Journal of Hazardous Materials. 2005. V. 121. No. 1–3. P. 195–202. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.02.008

3. Rossini G., Bernardes A.M. Galvanic sludge metals recovery by pyrometallurgical and hydrometallurgical treatment // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. V. 131. No. 1–3. P. 210–216. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.035
4. Krishnan S., Zulkapli N.S., Kamyab H., Taib S.M., Din M.F.M., Majid Z.A., Chairapat S., Kenzo I., Ichikawa Y., Nasrullah M., Chelliapan S., Othman N. Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview // *Environmental Technology & Innovation*. 2021. V. 22. No. 1–3. Article No. 101525. doi: 10.1016/j.eti.2021.101525
5. Jha M.K., Kumar V., Singh R.J. Review of hydro-metallurgical recovery of zinc from industrial wastes // *Resources, Conservation and Recycling*. 2001. V. 33. No. 1. P. 1–22. doi: 10.1016/S0921-3449(00)00095-1
6. Yang X., Wan Y., Zheng Y., He F., Yu Z., Huang J., Wang H., Ok Y.S., Jiang Y., Gao B. Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: A critical review // *Chemical Engineering Journal*. 2019. V. 366. P. 608–621. doi: 10.1016/j.cej.2019.02.119
7. Karnib M., Kabbani A., Holail H., Olama Z. Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite // *Energy Procedia*. 2014. V. 50. P. 113–120. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.014
8. Ngah W.W., Fatinathan S. Adsorption of Cu(II) ions in aqueous solution using chitosan beads, chitosan–GLA beads and chitosan–alginate beads // *Chemical Engineering Journal*. 2008. V. 143. No. 1–3. P. 62–72. doi: 10.1016/j.cej.2007.12.006
9. Abdullah N., Yusof N., Lau W.J., Jaafar J., Ismail A.F. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2019. V. 76. P. 17–38. doi: 10.1016/j.jiec.2019.03.029
10. Yang X., Liu L., Tan W., Qiu G., Liu F. High-performance Cu<sup>2+</sup> adsorption of birnessite using electrochemically controlled redox reactions // *Journal of Hazardous Materials*. 2018. V. 354. P. 107–115. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.04.069
11. Ojovan M.I., Lee W.E., Kalmykov S.N. Treatment of radioactive wastes // *An introduction to nuclear waste immobilisation* / Eds. M.I. Ojovan, W.E. Lee, S.N. Kalmykov. Amsterdam: Elsevier, 2019. P. 231–269. doi: 10.1016/B978-0-08-102702-8.00016-9
12. Amaral F.A.D., dos Santos V.S., Bernardes A.M. Metals recovery from galvanic sludge by sulfate roasting and thiosulfate leaching // *Minerals Engineering*. 2014. V. 60. No. 3. P. 1–7. doi: 10.1016/j.mineng.2014.01.017
13. Shanableh A., Omar M. Bio-acidification and leaching of metals, nitrogen, and phosphorus from soil and sludge mixtures // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 2003. V. 12. No. 4. P. 565–589. doi: 10.1080/713610989
14. Li C., Xie F., Ma Y., Cai T., Li H., Huang Z., Yuan G. Multiple heavy metals extraction and recovery from hazardous electroplating sludge waste via ultrasonically enhanced two-stage acid leaching // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. V. 178. No. 1–3. P. 823–833. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.02.013
15. de Souza E Silva P.T., de Mello N.T., Menezes Duarte M.M., Montenegro M.C.B.S.M., Araújo A.N., de Barros Neto B., da Silva V.L. Extraction and recovery of chromium from electroplating sludge // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. V. 128. No. 1. P. 39–43. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.026
16. Torras J., Buj I., Rovira M., de Pablo J. Chromium recovery from exhausted baths generated in plating processes and its reuse in the tanning industry // *Journal of Hazardous Materials*. 2012. V. 209–210. P. 343–347. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.01.036
17. Chen D.T., Au W.Y., van Ewijk S., Roy A., Stegemann J.A. Elemental and mineralogical composition of metal-bearing neutralisation sludges, and zinc speciation – A review // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. V. 416. Article No. 125676. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125676
18. Luz C.A., Rocha J.C., Cheriaf M., Pera J. Valorization of galvanic sludge in sulfoaluminate cement // *Construction and Building Materials*. 2009. V. 23. No. 2. P. 595–601. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.004
19. Stepanov S., Morozov N., Morozova N., Ayupov D., Makarov D., Baishev D. Efficiency of use of galvanic sludge in cement systems // *Procedia Engineering*. 2016. V. 165. No. 309. P. 1112–1117. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.827
20. Bednarik V., Vondruska M., Koutny M. Stabilization/solidification of galvanic sludges by asphalt emulsions // *Journal of Hazardous Materials*. 2005. V. 122. No. 1–2. P. 139–145. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.03.021
21. Bocanegra J.J.C., Mora E.E., González G.I.C. Galvanic sludges: Effectiveness of red clay ceramics in the retention of heavy metals and effects on their technical properties // *Environmental Technology & Innovation*. 2019. V. 16. No. 6. Article No. 100459. doi: 10.1016/j.eti.2019.100459
22. Felisberto R., Santos M.C., Arcaro S., Basegio T.M., Bergmann C.P. Assessment of environmental compatibility of glass-ceramic materials obtained from galvanic sludge and soda-lime glass residue // *Process Safety and Environmental Protection*. 2018. V. 120. No. January/March (329). P. 72–78. doi: 10.1016/j.psep.2018.08.032
23. Zhang J., Liu B., Zhang S. A review of glass ceramic foams prepared from solid wastes: Processing, heavy-metal solidification and volatilization, applications // *The Science of the Total Environment*. 2021. V. 781. Article No. 146727. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146727
24. Ardit M., Zanelli C., Conte S., Molinari C., Cruciani G., Dondi M. Ceramisation of hazardous elements: Benefits and pitfalls of the inertisation through silicate ceramics // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. V. 423. No. Pt A. Article No. 126851. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126851
25. Mazhuga A.G., Kolesnikov V.A., Sakharov D.A., Korolkov M.V. Technogenic waste of I and II hazard classes – a resource for obtaining secondary products // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 61–67 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-061-067