

ОТЗЫВ

на автореферат и диссертацию Выдыш Степана Олеговича
на тему **«Повышение комплексности переработки шламов электролитического рафинирования вторичной меди»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Работа Выдыша Степана Олеговича посвящена одной из важных тем медной промышленности – переработке медьэлектролитных шламов вторичного производства, образуемых в результате переработки медьсодержащих ломов. Подобные шламы отличаются низким содержанием селена и теллура, и высоким содержанием олова и никеля. Современные технологии переработки шламов электролитического рафинирования вторичной меди (далее – ЭРВМ) аналогичны технологиям переработки шламов из первичного сырья и сопряжены с потерями благородных металлов и других ценных компонентов. Разработка комплексной ресурсо- и энергосберегающей технологии представляется весьма актуальной.

Автором разработана методика «Расчет энтальпии образования сложных соединений с учетом долевого вклада энергий связей» с применением концепции электроотрицательности, снижающая ошибку расчета для кристаллогидратов и двойных солей до 1-2 %, по которой рассчитаны энтальпии образования $\text{CuPbSO}_4(\text{OH})_2$, $\text{Cu}_5(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, входящих в состав шлама. В рамках диссертационной работы исследованы влияние термической обработки (обжиг и СВЧ) на совместное извлечение Cu и Ag в раствор сернокислотного выщелачивания шлама ЭРВМ. Технологическими исследованиями подтверждена эффективность селективного извлечения меди из шлама ЭРВМ с попутной конверсией сульфата свинца в соль угольной кислоты, а также уточнены режимы низкотемпературного аммиачно-аммонийного выщелачивания. Выполнена технологическая проверка возможности извлечения серебра и золота из обогащенного по БМ шлама царско-водочной и кислотнo-тиосульфатной обработкой. Для расчёта кинетических характеристик определены кажущаяся энергии активации, порядок процесса по реагенту и определены лимитирующие режимы выщелачивания для процессов: аммиачного выщелачивания меди из шлама ЭРВМ и азотнокислого выщелачивания серебра в присутствии пероксида водорода и без.

Научная новизна исследования заключается в разработке новых методов и подходов к селективному извлечению меди и серебра из шлама электролитического рафинирования. Впервые установлено, что при сернокислотном выщелачивании шлама после окислительного обжига серебро извлекается за счет образования растворимых в серной кислоте фаз — гидроксосульфата меди $(\text{AgCu}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O})$ и сульфата серебра. На основе термодинамического анализа аммиачно-аммонийной системы была математически описана зависимость равновесных концентраций ионов $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^+$, $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ и расхода реагентов от состава аммиачного раствора, что позволило оптимизировать процесс выщелачивания меди. Впервые предложен окислительно-восстановительный потенциал системы $(+245 \pm 10 \dots +280 \pm 10 \text{ мВ})$ как критерий селективного извлечения меди при аммиачном выщелачивании, который подавляет переход серебра в раствор. Исследована кинетика аммиачного выщелачивания меди, где выявлена взаимосвязь между концентрацией $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и NH_4^+ и сменой режима выщелачивания с

кинетического с лимитированием скорости процесса адсорбцией реагентов на поверхности твердых частиц на диффузионный, что позволяет эффективно управлять процессом и извлекать медь. Также проведены кинетические исследования выщелачивания серебра в азотной кислоте с применением пероксида водорода для подавления нитрозных газов, где установлены зависимости скорости реакции от температуры и концентрации реагентов, что позволило выявить условия эффективного выщелачивания серебра и оптимизировать процесс.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке и внедрении эффективных технологий для переработки шлама электролитического рафинирования, обеспечивающих высокую степень извлечения ценных металлов с минимальными затратами ресурсов и энергии. Разработанная методика расчета энтальпии образования сложных соединений значительно снижает погрешность при термодинамическом анализе взаимодействий в системах выщелачивания, что улучшает точность прогнозирования технологических процессов. Комплексные исследования селективного извлечения металлов позволили определить оптимальные режимы для различных методов выщелачивания (аммиачного, ацетатного, кислотного-тиосульфатного), что обеспечивает высокие показатели извлечения меди (не менее 99 %), свинца (не менее 93 %), бария (до 95 %), олова (до 89 %), серебра (не менее 95 %), золота (не менее 77 %) и других благородных металлов. Внедрение предложенной ресурсо- и энергосберегающей схемы переработки в укрупненных лабораторных условиях было успешно апробировано на предприятии, что подтверждает возможность масштабирования в полупромышленных масштабах.

Степень достоверности работы не вызывает сомнений. Полученные результаты исследований базируются на применении комплекса современных методов исследования, которые подтверждают и взаимно дополняют друг друга, а также согласуются с полученными данными других авторов. По теме диссертации опубликовано 8 работ, 3 из них в рецензируемых научных журналах рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом НИТУ «МИСИС», в том числе 3 – в международных базах данных Scopus и WoS, в сборниках тезисов докладов научных конференций – 4, зарегистрировано 1 ноу-хау.

По автореферату и диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. Принципиальная технологическая схема (рисунок 87, стр. 148) подразумевает под собой модульность в зависимости от поступающего сырья, что в целом делает схему достаточно гибкой. Однако в тексте диссертации не раскрыты составы получаемых растворов, поступающих на нейтрализацию и их возможные способы утилизации/нейтрализации.
2. В диссертации не представлена аппаратурно-технологическая схема предлагаемой технологии, что вызывает вопросы о необходимом составе как основного, так и вспомогательного оборудования. С учетом переменного состава сырья часть оборудования может простаивать, что указывает на необходимость оптимизации оборудования для каждого модуля с учетом изменчивого состава перерабатываемых шламов.
3. В главе 6 диссертации отсутствует информация о кратности промывки полупродуктов и конечных продуктов. Это особенно важно, учитывая, что в некоторых модулях (2 и 4) происходит смена среды с кислой на щелочную. Недостаточная промывка может негативно сказаться на качестве осадков, может

привести к повышенному расходу реагентов, что поднимает вопрос о водном балансе и водообороте технологической схемы. Необходимы разъяснения относительно управления промывными водами, их переработки или утилизации.

Указанные замечания не снижают общей ценности и положительного впечатления о работе, которая выполнена на высоком научном и экспериментальном уровне, и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации. Замечания носят лишь дискуссионный характер.

Автором на основании выполненного комплекса исследований разработана методика «Расчет энтальпии образования сложных соединений с учетом долевого вклада энергий связей» с применением концепции электроотрицательности, являющееся научным достижением для выполнения термодинамического анализа схожих процессов. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой предложено решение актуальной задачи, позволяющей повысить комплексность и глубину переработки шламов электролитического рафинирования вторичной меди.

Представленные в автореферате и диссертации научные и практические результаты свидетельствуют о том, что диссертационная работа Выдыша Степана Олеговича, является научным исследованием, направленным на повышение комплексности переработки промпродуктов металлургического производства, актуальность которого обусловлена Постановлением Правительства РФ от 29 декабря 2023 года № 2394. Диссертационная работа полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС» и требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой степени по научной специальности 2.6.2. «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Менеджер проектов
ООО «НОРД Инжиниринг»
канд. техн. наук



Русалев Ростислав Эдуардович

«15» октября 2024 г.

119071, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Донской, пр-кт Ленинский, д. 15А, офис 21;

Рабочий телефон: +7 (499) 390-87-90

E-mail: r.rusalev@mailnord.net

Подпись Русалева Ростислава Эдуардовича заверяю

Директор по экономике и финансам
ООО «НОРД Инжиниринг»
канд. экон. наук



Астанин Д. Ю.

«15» октября 2024 г.