

УДК: 669.2/.8

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.7

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КОБАЛЬТОСОДЕРЖАЩИХ КЕКОВ



**Эшонкулов Учкун
Худойназар угли**

Доктор философии (PhD) по
техническим наукам, заведующий
кафедрой геологии и горного
дела, Каршинский
государственный технический
университет, Карши,
Узбекистан
E-mail:
uchqun.eshonqulov19@mail.ru
ORCID ID: 0009-0002-8415-7218
Science ID: FQD-0225-0022



**Хасанов Абдирашид
Салиевич**

Доктор технических наук,
профессор, заместитель
директора по технологиям
Центра развития и внедрения
инновационных технологий АО
«Алмалыкский горно-
металлургический комбинат»,
Алмалык, Узбекистан
E-mail: a.hasanov@srt-journal.uz
ORCID ID: 0009-0004-9162-7622
Science ID: DTV-1225-0005



**Каршиев Хумоюн
Комилович**

Старший преподаватель, доктор
философии (PhD) по
техническим наукам,
Алмалыкский государственный
технический институт,
Алмалык, Узбекистан
E-mail: qarshiyev0409@gmail.com
ORCID ID: 0009-0003-6457-8266
Science ID: MSN-0525-0036

Аннотация. В статье анализируются современные гидрометаллургические методы извлечения кобальта из промежуточных продуктов цинкового производства. Особое внимание уделяется кекам с содержанием кобальта 0,5-3,0% и цинка 40-60%. Рассмотрено образование этих промежуточных продуктов, их экологическая опасность и возможность извлечения кобальта, кадмия и цинка из их состава путем переработки в металлургической промышленности. Сравнивали селективное кислотное выщелачивание, окислительное осаждение и аммиачно-сульфатную аммиачную обработку. Анализ результатов ранее проведенных исследований показывает, что регулирование pH и окислительно-восстановительного потенциала позволяет растворять более 90% цинка, сохраняя при этом основную часть кобальта в твердом остатке. При окислении Co^{2+} до Co^{3+} можно получить продукт, содержащий более 50% кобальта, и раствор с концентрацией остаточного металла менее 1 мг/л. Озон при pH 4,0 обеспечивает осаждение более 98% кобальта, но требует больших эксплуатационных затрат. Сделан вывод, что при выборе технологии необходимо учитывать селективность отделения металлов, расход реагентов, возможность возврата растворов в производство и экологические последствия переработки кеков.

Ключевые слова: Кобальт-никелевый кек, гидрометаллургия, техногенное сырье, кислотное селективное выщелачивание, селективное выщелачивание, окислительное осаждение, аммиачное селективное выщелачивание, цементация, электролит, диаграмма Eh-pH, озон, окислители, персульфат натрия, аминокомплексы, извлечение металлов, разделение компонентов, производство цинка.

Received: 25.07.2026

Accepted: 03.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

KOBALT TARKIBLI KEKLARNI GIDROMETALLURGIK QAYTA ISHLASHNING ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALARI

Eshonkulov Uchqun
Xudonazar o'g'li

PhD, Qarshi davlat texnika
universiteti, Geologiya va konchilik
ishi kafedrası mudiri, Qarshi,
O'zbekiston

Xasanov Abdirashid
Saliyevich

Texnika fanlari doktori, professor,
"Olmaliq kon-metallurgiya
kombinati" AJ Innovatsion
texnologiyalarni rivojlantirish va
joriy etish markazi texnologiya
bo'yicha direktor o'rinbosari,
Olmaliq, O'zbekiston

Qarshiyev Humoyun
Komilovich

Katta o'qituvchi, t.f.f.d. (PhD),
Olmaliq davlat texnika instituti,
Olmaliq, O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada rux ishlab chiqarishning oraliq mahsulotlaridan kobaltni ajratib olishning zamonaviy gidrometallurgik usullari tahlil qilingan. Tarkibida 0,5–3,0% kobalt va 40–60% rux bo'lgan keklarga alohida e'tibor qaratilgan. Unda ushbu oraliq mahsulotlarning hosil bo'lishi, ekologik xavfi hamda metallurgiya sanoatida qayta ishlash orqali tarkibidan kobalt, kadmiy va ruxni ajratib olish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Selektiv kislotali eritmaga o'tkazish, oksidlovchi cho'ktirish va ammiakli-sulfatli ishlov berish usullari taqqoslangan. Avvalgi tadqiqotlar natijalarining tahlili shuni ko'rsatadiki, pH va oksidlanish-qaytarilish potensialini tartibga solish orqali kobaltning asosiy qismini qattiq qoldiqda saqlagan holda, ruxning 90 foizdan ortig'ini eritish mumkin. Co^{2+} ionini Co^{3+} gacha oksidlash orqali tarkibida 50 foizdan ortiq kobalt bo'lgan mahsulot va qoldiq metall konsentratsiyasi 1 mg/l dan kam bo'lgan eritma olish mumkin. Ozon pH 4,0 da kobaltning 98 foizdan ko'prog'ini cho'ktirishni ta'minlasa-da, ushbu jarayonga katta ekspluatatsion xarajatlarni talab etiladi. Xulosa qilib aytganda, texnologiyani tanlashda metallarni ajratishning selektivligini, reagentlar sarfini, eritmalarni ishlab chiqarishga qaytarish imkoniyatini va keklarni qayta ishlashning ekologik oqibatlarini hisobga olish zarur.

Kalit so'zlar: Kobalt-nikel kek, gidrometallurgiya, texnogen xomashyo, kislotali selektiv tanlab eritish, selektiv tanlab eritish, oksidlovchi cho'ktirish, ammiakli selektiv tanlab eritish, sementatsiya, elektrolit, Eh-pH diagrammasi, ozon, oksidlovchilar, natriy persulfat, aminokomplekslar, metallarni ajratib olish, komponentlarni ajratish, rux ishlab chiqarish.

MODERN HYDROMETALLURGICAL TECHNOLOGIES FOR THE PROCESSING OF COBALT-CONTAINING CAKES

Eshonkulov Uchkun
Khudonazar ugli

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Head of the
Department of Geology and Mining,
Qarshi State Technical University,
Qarshi, Uzbekistan

Khasanov Abdurashid
Solievich

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Deputy Director for
Technology, Center for the
Development and Implementation of
Innovative Technologies, JSC
"Almalyk Mining and Metallurgical
Combine", Almalyk, Uzbekistan

Karshiev Khumoyun
Komilovich

Senior Lecturer, Doctor of
Philosophy (PhD) in Technical
Sciences, Almalyk State Technical
Institute, Almalyk, Uzbekistan

Abstract. The article analyzes modern hydrometallurgical methods for extracting cobalt from intermediate products of zinc production. Particular attention is paid to filter cakes with a cobalt content of 0.5–3.0% and a zinc content of 40–60%. The formation of these intermediate products, their environmental hazards, and the possibility of extracting cobalt, cadmium, and zinc from them through processing in the metallurgical industry are considered. Selective acid leaching, oxidative precipitation, and ammonia-sulfate leaching were compared. An analysis of previous research shows that controlling the pH and redox potential allows for the dissolution of over 90% of the zinc while retaining most of the cobalt in the solid residue. By oxidizing Co^{2+} to Co^{3+} , it is possible to obtain a product containing over 50% cobalt and a solution with a residual metal concentration below 1 mg/L. Ozone at a pH of 4.0 ensures the precipitation of over 98% of the cobalt but incurs high operational costs. It is concluded that when selecting a technology, one must consider the selectivity of metal separation, reagent consumption, the feasibility of recycling solutions back into the production cycle, and the environmental consequences

of processing the filter cakes.

Keywords: Cobalt-nickel cake, hydrometallurgy, technogenic raw materials, acid selective leaching, selective leaching, oxidative precipitation, ammonium selective leaching, cementation, electrolyte, Eh-pH diagram, ozone, oxidizers, sodium persulfate, amino complexes, metal extraction, component separation, zinc production.

Введение. Рост производства аккумуляторных батарей, огнеупорных сплавов и катализаторных материалов приводит к увеличению спроса на кобальт. В то же время это объясняется качеством первичного сырья для выплавки металла, сложностью переработки комплексных руд и различным распределением природных ресурсов. Поэтому наряду с традиционными месторождениями практический интерес представляют техногенное сырье и отходы, образующиеся в металлургической промышленности, а также промежуточные продукты, содержащие кобальт в концентрации, достаточной для промышленного извлечения.

Большая часть кобальта получается гидрометаллургическими методами, обеспечивающими переход металлов в раствор с последующим их селективным разделением. Перспективными источниками вторичного сырья являются кеки, образующиеся при очистке растворов цинка перед электролизом. Они содержат не только кобальт и цинк, но и кадмий, никель, медь и свинец. Накопление такого техногенного сырья не только приводит к потере ценных компонентов, но и оказывает долгосрочное негативное воздействие на окружающую среду.

Технологическая ценность кеков определяется относительно высоким содержанием в них металлов: концентрация кобальта в их составе достигает 0,5-3,0%, а цинка - 40-60%. Поэтому их следует рассматривать не только как отходы цинкового производства, но и как многокомпонентное техногенное сырье. Выбор рационального способа переработки требует учета химических форм металлов, кислотности среды, окислительно-восстановительного потенциала и поведения сопутствующих металлов. Наряду с этим, актуальной задачей является сравнительная оценка существующих гидрометаллургических методов извлечения и концентрирования кобальта с

возможностью возврата цинксодержащих растворов в основное производство.

Промежуточные продукты гидрометаллургии цинка являются перспективным источником кобальта. При обжиге цинковых концентратов и их последующей выщелачивании серной кислотой, кобальт вместе с цинком, медью, кадмием и никелем переходит в раствор. Для подготовки раствора к электролизу примеси из него удаляют путем цементации цинковым порошком, в результате чего образуется кобальтсодержащий кек. Содержание кобальта в таких кеках достигает 0,5-3,0%, а цинка - 40-60%, что позволяет использовать их в качестве ценного техногенного сырья.

Обзор литературы. В настоящее время примерно 70% мирового кобальта производится с использованием гидрометаллургических методов, включающих восстановительный обжиг - выщелачивание аммиачными растворами или процессы кислотного выщелачивания под высоким давлением. Полученные растворы после очистки используются для получения кобальта путем электроосаждения [1, 2, 3].

Однако при постоянно растущем спросе на кобальт первичные ресурсы год за годом уменьшаются. Таким образом, максимальная извлечения кобальта из вторичных ресурсов вызывает серьезную вниманию.

В настоящее время вторичные ресурсы, которые могут быть использованы для извлечения кобальта в основном включают хвосты флотации кобальтового минерала, металлургические отходы и побочные продукты в процессе выплавки меди, никеля и цинка, а также отработанные катализаторы и батареи.

Содержание кобальта в металлургических отходах и промпродуктах выше, чем у первичных руд. Таким образом, явно экономично и целесообразно извлекать кобальт из вторичных металлургических отходов, что может снизить зависимость от первичного минерала кобальта [4, 5].

Как было сказано выше, кобальт всегда ассоциируется с медью, цинком, никелем и др. Однако содержание кобальта в цинковых концентратах в целом низкое (примерно 0,001–0,005%) [6].

При гидрометаллургической переработке цинковых концентратов, кобальт содержащийся в них, после окислительного обжига при сернокислотном выщелачивании переходит в раствор совместно с цинком. [7]. Однако этот раствор не подходит для электролиза цинка, так как он обычно содержит некоторые примеси как медь, кадмий, никель и кобальт. Примеси как железо, никель и кобальт при электроосаждении цинка, приводят к избыточному расходу электроэнергии за счет осаждения на поверхности цинка и повторного растворения в кислом электролите. особенно железа, никеля и кобальта, может приводит к расходу энергии за счет осаждения на поверхность цинка и повторного растворения в кислом электролите. Таким образом, для удаление этих примесей используется процесс очистки. Порошки цинка обычно используются для удаления примесей способом цементации. В кислых водных растворах сульфата цинка медь и кадмий цементируются быстро, в то время как цементация кобальта затруднена и медленна, так как его осаждение затруднено [8, 9]. Однако при введении цинкового порошка в качестве активаторов меди и мышьяка или сурьмы цементация кобальта может быть успешно завершена.

В условиях сокращения доступных запасов природного кобальтового сырья всё большее значение приобретает переработка металлургических промпродуктов. Особый интерес представляют кеки, в которых накапливаются кобальт и другие цветные металлы. Благодаря содержанию ценных компонентов такие материалы рассматриваются не только как отходы производства, но и как перспективный техногенный источник металлургического сырья [10, 11]

Разнообразные цинковые концентраты и процессы очистки, используемые в гидрометаллургии цинка, приводят к разнообразию минералогического и химического составов и элементов, присутствующих в кеках.

Способы извлечение цинка и кобальта из кеков в основном включают окислительное осаждение, селективное кислотное выщелачивание, аммиачно–сульфатное выщелачивание и т.д.

Процесс селективного кислотного выщелачивания. Известно, что в соответствии с механизмом очистки цинкового электролита от кобальта цинк, кобальт и сопутствующие элементы в составе кеков находятся преимущественно в виде самостоятельных минеральных фаз и химических соединений.

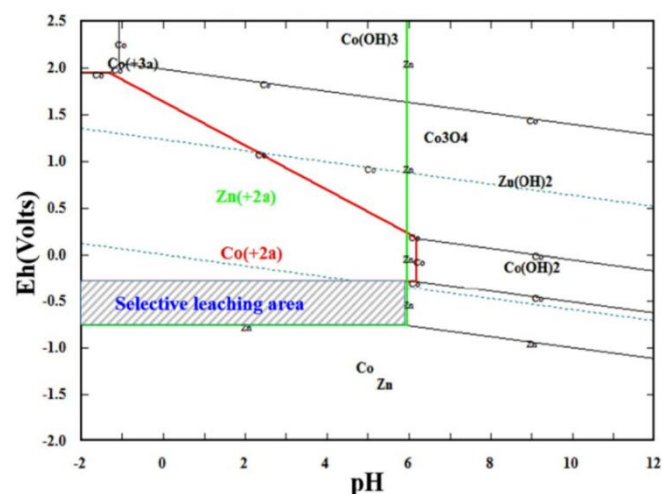


Рис.1. Диаграмма Eh-pH системы Zn-Co-H₂O при 25 °C.

Кислотное выщелачивание кеков является одним из наиболее эффективных методов гидрометаллургической переработки, обеспечивающим перевод кобальта, цинка и других ценных компонентов из труднорастворимых соединений и фаз твёрдого материала в растворимую форму, а термодинамические данные, иллюстрирующие области стабильности частиц, представлены на рис. 1, концентрация Zn^{2+} и Co^{2+} были выбраны как 1 моль/л и 0,01 моль/л.

Диаграмма Eh – pH системы Zn–Co–H₂O при 25 °C указывает на то, что электродный потенциал Zn^{2+}/Zn более отрицателен, чем электродный потенциал Co^{2+}/Co (–0,763 и –0,277, соответственно). Из диаграммы видно, что Zn^{2+} и Co^{2+} могут присутствовать в растворе без образования гидроксидов при pH менее 5,85. Поэтому, контролируя потенциал раствора и pH в определенном диапазоне, так как зона

селективного выщелачивания, показанная на рис. 3, цинк из кека может быть переведен в раствор, в то время как кобальт остаётся в осадке от выщелачивания остаток от выщелачивания. Этот метод разделения цинка и кобальта определяется как селективное кислотное выщелачивание, и его механизм выщелачивания можно объяснить гальванической реакцией $Zn - Co$, как показано на рис. 2.

Поскольку восстановительный потенциал цинка ниже, чем у кобальта, гальванический элемент с цинком в качестве отрицательного электрода и кобальтом в качестве положительного электрода может образовываться при помещении кека в кислоту определенной концентрации. Реакция окисления на отрицательном электроде приводит к превращению Zn в Zn^{2+} с высвобождением электронов.

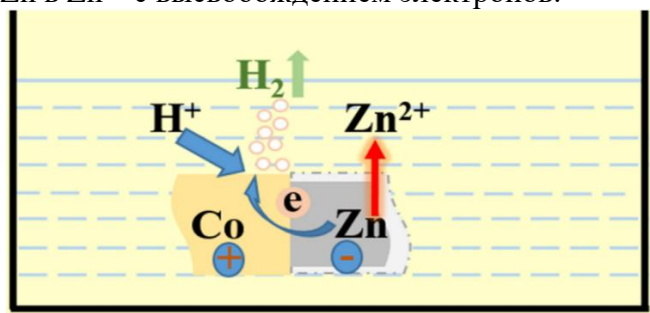


Рис.2. Механизм селективного выщелачивания.

В результате протекания электрохимической реакции происходит растворение цинка, содержащегося в кеке, при этом кобальт, обладающий более электроположительным потенциалом, концентрируется в остатке выщелачивания.

На основе механизма селективного выщелачивания, ученые [12] изучали извлечение кобальта из кобальтсодержащего кека содержащий от 0,6 до 1,0% кобальта после очистки. В растворе серной кислоты 150 г/л, присутствующие металлы выщелачивались из кека при строгом контроле pH реакционной пульпы, и в конечном итоге был получен остаток от выщелачивания с концентрацией кобальта от 6 до 12%. В дополнение выщелачивающий раствор, богатый сульфатом цинка, можно было бы вернуть в гидрометаллургический процесс получения цинка.

Горячий кек цинкового завода после фильтрации использовался [13] для селективного выщелачивания цинка, а эффективность выщелачивания Zn было выше 95% при низком растворении других металлических элементов при оптимальных условиях выщелачивания (температура 60 °C, время 120 мин, pH 5, соотношение твердой и жидкой фаз (Т:Ж) 6:1 и скорость перемешивания 625 об/мин).

В работе [14] рассмотрено, что в результате селективного выщелачивания кека был получен раствор, содержащий 141 г/л Zn , 53 г/л Cd , 0,01 г/л Co и 0,003 г/л Ni . По сути, контролируя потенциал кислотного раствора и pH, селективное выщелачивание может приводить к тому, что более 90% цинка в кеке растворяется в растворе в форме сульфата цинка, в то время как более 90% кобальта остается в остатке после выщелачивания [15, 16].

Следовательно, селективное выщелачивание является эффективным методом извлечения цинка, а содержание кобальта в кеке после выщелачивания увеличивается в 10 раз, что является благоприятным показателем к дальнейшему извлечению кобальта. Однако при кислотном выщелачивании примеси, такие как кадмий и цинк, растворяются в растворе одновременно с цинком, что указывает на то, что требуется ряд строгих процессов очистки и требуется отделить эти элементы друг от друга для их дальнейшей переработки.

Процесс окисления-осаждения. Кобальт имеет два валентных состояния (Co^{2+} и Co^{3+}), и их физические и химические свойства в растворе заметно отличаются. Когда Co^{2+} окисляется до трехвалентного, его устойчивая область существования в растворе резко уменьшается, как показано на рис. 3.

Реакция гидролиза Co^{3+} и образование $Co(OH)_3$ будет происходить и при повышенной кислотности. На рис. 3. показано, что значения pH, необходимые для реакция гидролиза Co^{3+} и Zn^{2+} составляет -1,08 и 5,95 при 25 °C, соответственно, что приводит к наличию отдельной сосуществующей области $Co(OH)_3$ и Zn^{2+} при pH раствора от -1,08 до 5,95. Кроме того, концентрация кобальта в растворе может быть снижена до минимального уровня при

окислении–осаждении, поскольку растворимость $\text{Co}(\text{OH})_3$ значительно мала ($K_{sp} = 2 \times 10^{-44}$). Таким образом, процесс окисление-осаждение является высокоэффективным методом разделения кобальта и цинка в растворе путем окисления двухвалентных ионов кобальта в трехвалентные. Широко используемыми окислителями являются H_2O_2 [17,18], NaClO , NaClO_3 , KMnO_4 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ и др.

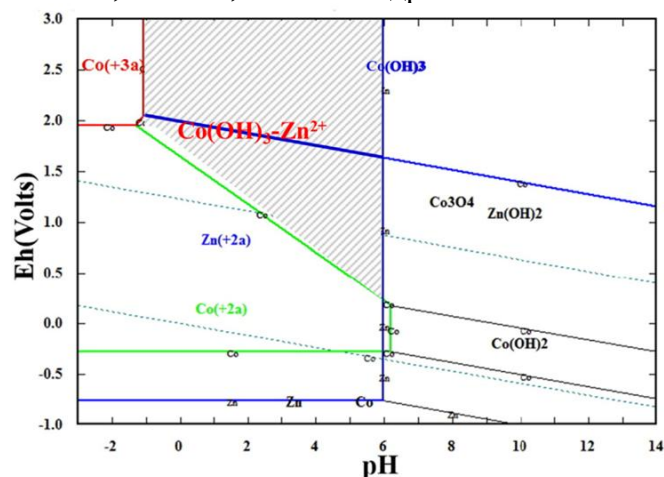
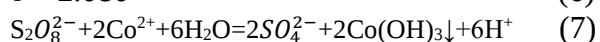
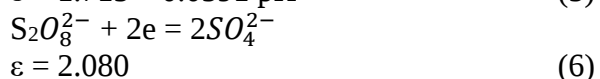
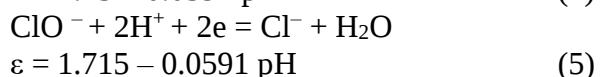
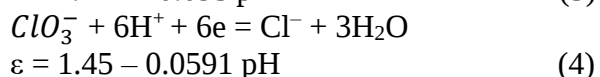
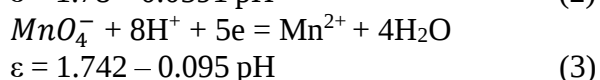
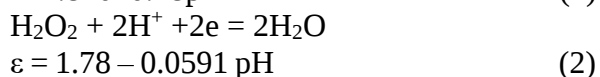
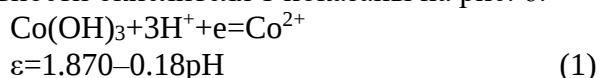


Рис.3. Доминирующая область окисленно – осажженного кобальта на диаграмме Eh–pH системы Zn–Co–H₂O при 25 °C (концентрации Zn^{2+} и Co^{2+} выбраны как 1 и 0,01 моль/л).

Для сравнения их окислительной способности Хонг и Го [19, 20] рассчитали и проанализировали зависимость между окислительным потенциалом окислителя и pH, и результаты расчета уравнений (1.1)–(1.6) при активности окислителя 1 показаны на рис. 6.



Результаты показали, что окислительные потенциалы этих окислителей уменьшаются с

увеличением pH раствора, за исключением $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$. Рассмотрен процесс окисления–осаждения кека. Во многих исследованиях эксперименты были проведены с использованием $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ в качестве окислителя [21, 22, 23]. Технологическая схема показана на рис. 5, а реакция механизм выражается как уравнение (1.5).

При окислении и гидролизе ионов кобальта, концентрация H^+ увеличится, а pH раствора уменьшается, что не способствует гидролизу и осаждению ионов кобальта. Следовательно, необходимо регулирование pH раствора для обеспечения эффективности отделения кобальта, и для этого обычно используется раствор гидроксида натрия. Таким образом, при переработке кека, цинк переходит в раствор, кобальт осаждается (содержание кобальта выше 50%). Цинкосодержащий раствор с содержанием кобальта менее 1 мг/л можно использовать в электролизе цинка. Кроме того, окисление и осаждение кобальта с использованием персульфата аммония изучал Гюлер и Сейранкая [24], они исследовали влияние pH раствора, температуры и концентрации окислителя.

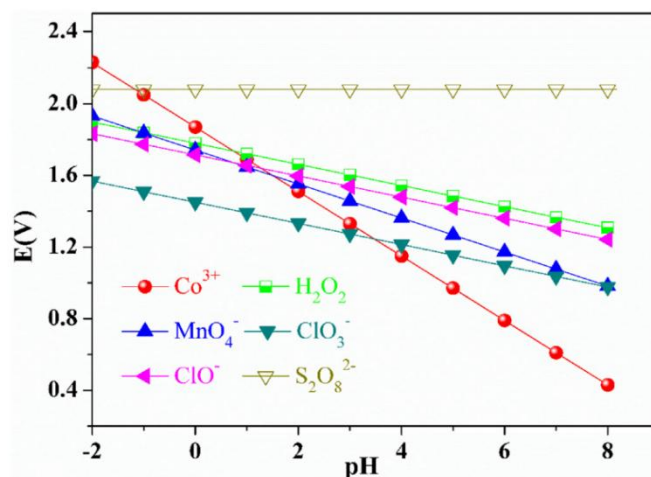


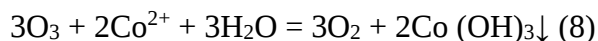
Рис.4. Связь между электродным потенциалом и pH оксидантов в стандартном состоянии.

Результаты показали, что степень извлечения кобальта колеблется от 70 до 90% в зависимости от концентрации окислителя, а ионы кобальта осаждаются в виде CoOOH (В присутствии щелочи суспензии $\text{Co}(\text{OH})_2$

окисляются воздухом до коричневого $\text{CoO}(\text{OH})$, причем это окисление быстро осуществляется окислителями, такими как гипохлорит, бромная вода или перекись водорода [25]. Кроме того, эффективность осаждения кобальта была связано с его концентрацией: при более высокой концентрации наблюдается лучший эффект осаждения.

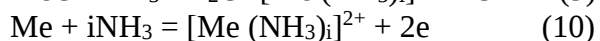
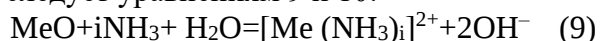
Озон считается чистым окислителем, поскольку он превращается в кислород или оксиды после реакции [26]. Об окислительном осаждении кобальта с использованием озона сообщалось во многих исследованиях [27] и его механизм может быть выражен как уравнение (8). Более 98% кобальта в растворе можно окислить и осадить контролируемым методом, а оптимальный pH раствора для извлечения кобальта выбран равным 4,0. Изучение кинетики реакции окисления–осаждения кобальта (II) показало, что реакция осаждения соответствует модели, контролируемой диффузией. Таким образом, кобальт можно эффективно отделить от цинка без вторичного загрязнения с помощью окислителя озона.

Однако высокая стоимость производства озона ограничивает его применение. Другие окислители, такие как KMnO_4 и NaClO , используются для разделения цинка и кобальта методом окисление–осаждение, позволяло добиться и высокого извлечения кобальта в остаток выщелачивания. Однако, как показано в уравнениях (1.3)-(1.6), Mn^{2+} и Cl^- будут растворяться в растворе, что приводит к вторичному загрязнению выщелачивающего раствора, направляемого на электроосаждение цинка.



Процесс аммиачно–сульфатно–аммиачного выщелачивания. Оксиды цинка, кобальта, меди и кадмия растворяются в аммиачно - водных растворах сульфата аммония, образуя устойчивые комплексы ионов металлов и аммиака, а их металлы также могут образовывать аммиачные комплексы в присутствии окислителей.

Уравнения реакции можно представить в виде следуют уравнениям 9 и 10:



где Me Zn, Co, Cu, Cd, а i представляет собой количество молекул аммиака в комплексе и составляет от 1 до 6.

С увеличением концентрации аммиака количество молекул аммиака в комплексе увеличивается, а стабильность комплекса улучшается.

Значения констант устойчивости амминных комплексов кобальта при комнатной температуре 25°C приведены в табл. 1. Представленные данные свидетельствуют о том, что повышение концентрации аммиака способствует образованию устойчивых амминных комплексов кобальта, что, в свою очередь, благоприятно влияет на процесс его выщелачивания.

На основе механизма кобальт-аммиачных комплексов, Чжао Тинкай и Тан Мотанг и др. изучали извлечение цинка и кобальта из кеков гидрометаллургии цинка с использованием процесса аммиачно-сульфатно-аммиачного (АСА) выщелачивания.

Таблица 1.

Константа устойчивости комплекса кобальт–аммиак при комнатной температуре.

Типы комплексов	$\text{Co}(\text{NH}_3)_2^{2+}$	$\text{Co}(\text{NH}_3)_3^{2+}$	$\text{Co}(\text{NH}_3)_4^{2+}$	$\text{Co}(\text{NH}_3)_5^{2+}$	$\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{2+}$	
$\lg \beta_i$	2,11	3,74	4,79	5,55	5,73	5,11



Рис.5. Технологическая схема процесса окисления-осаждения с использованием $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ в качестве окислителя.

Технологическая схема процесса АСА показана на рис.6.

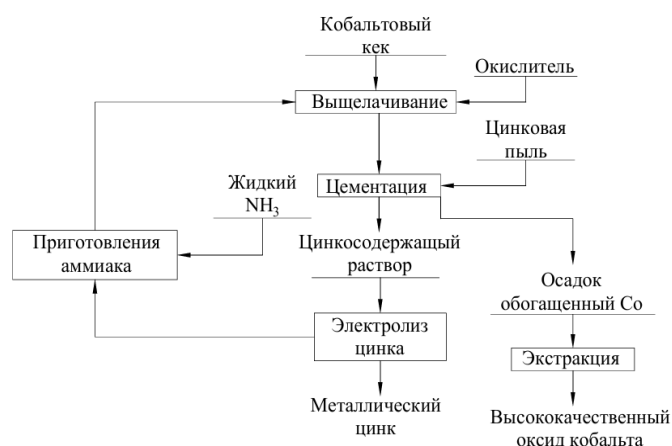


Рис. 6. Технологическая схема процесса АСА.

Объект и методика исследования.

Объектом исследования являются кобальтсодержащие кеки, образующиеся при производстве цинка. В зависимости от условий образования, в составе такого техногенного сырья содержится 0,5-3,0% Со, 40-60% Zn, а также такие металлы, как кадмий, никель, медь и свинец.

Исследование было выполнено путём анализа и сопоставления опубликованных результатов по переработке кобальтсодержащих кеков методами селективного кислотного выщелачивания, окислительного осаждения и аммиачно-сульфатной обработки. Возможность разделения цинка и кобальта оценивалась с использованием Eh–pH диаграмм системы Zn–Co–H₂O, стандартных электродных потенциалов, произведений растворимости соединений, а также констант устойчивости аммиачных комплексов. При сопоставлении технологических схем учитывались степень извлечения металлов в раствор или осадок, селективность разделения компонентов, расход реагентов, параметры процесса и качество получаемых продуктов. Также были рассмотрены возможность возврата цинка в процесс электролиза после очистки цинксоодержащих растворов от примесей, вероятность образования вторичных отходов и перспективы промышленного применения изучаемых методов.

Результаты и их обсуждение. Сравнительный анализ опубликованных данных показывает, что кеки, образующиеся при очистке растворов цинка, можно рассматривать как самостоятельный источник кобальта и цинка. Если содержание кобальта в их составе

достигает 0,5-3,0%, то концентрация цинка составляет 40-60%. Такие показатели определяют целесообразность комплексного извлечения металлов и снижения объема отходов, направляемых на длительное хранение.

Кислотное выщелачивание основано на различных электрохимических свойствах цинка и кобальта. Более отрицательный потенциал пары Zn^{2+}/Zn в основном способствует растворению цинка, в то время как кобальт накапливается в твердой фазе. При температуре 60°C, продолжительности 120 мин, pH 5, соотношении Ж:Ж 6:1 и скорости перемешивания 625 об/мин извлечение цинка в раствор превышает 95%. Управление кислотностью и потенциалом пульпы позволяет растворять более 90% Zn и одновременно удерживать в остатке более 90% Со. В результате содержание кобальта в твердом продукте может увеличиться примерно в десять раз. Вместе с цинком в раствор частично переходят кадмий и другие примеси, поэтому полученный раствор нуждается в дополнительной очистке.

Другим методом разделения металлов является окислительное осаждение, при котором ион Co^{2+} переходит в ион Co^{3+} и затем образует малорастворимый $Co(OH)_3$. При использовании $Na_2S_2O_8$ образуется осадок, содержащий более 50% кобальта, а его остаточная концентрация в цинковом растворе снижается до уровня ниже 1 мг/л. В зависимости от количества вводимого окислителя степень осаждения кобальта составляет 70-90%.

Применение озона позволяет осаждать более 98% кобальта при pH 4,0. Преимуществом озонирования является отсутствие солевых продуктов, которые могут загрязнять раствор. Однако высокие затраты, связанные с получением озона, ограничивают промышленное применение этого метода. Перманганат калия и гипохлорит натрия также обеспечивают высокую степень осаждения кобальта, однако их применение приводит к накоплению в растворе ионов Mn^{2+} и Cl^- , нежелательных для дальнейшего электролиза цинка.

При аммиачно-сульфатно-аммиачном выщелачивании выделение Zn, Co, Cu и Cd происходит за счет образования растворимых аминоккомплексов. Увеличение концентрации

аммиака способствует образованию более устойчивых комплексных соединений и увеличивает перенос металлов в раствор. Однако эффективность процесса зависит не только от концентрации аммиака, но и от состава исходного кека, наличия окислителей и соотношения компонентов раствора выщелачивания.

Сравнение рассмотренных методов показывает целесообразность применения комбинированной технологии. На первой стадии основная часть цинка из кека может быть переведена в раствор путем выщелачивания, после чего кобальт накапливается в кеке. Очищенный раствор сульфата цинка можно вернуть в основной производственный цикл. Такая организация процесса повышает комплексность использования сырья, снижает расход первичных ресурсов и создает условия

для последующего извлечения кадмия, никеля, меди и других сопутствующих компонентов.

Закключение. Кобальтсодержащие кеки, образующиеся при производстве цинка, являются перспективным многокомпонентным техногенным сырьём. При селективном кислотном выщелачивании в раствор извлекается свыше 90% цинка, тогда как основная доля кобальта концентрируется в твёрдом остатке. Использование окислительного осаждения позволяет выделить более 98 % Со. Комбинирование этих методов обеспечивает получение обогащённого кобальтового продукта, возврат очищенных цинксодержащих растворов в производственный цикл и снижение экологического воздействия цинкового предприятия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Li, G. H., Rao, M. J., Li, Q. A., Peng, Z. W., & Jiang, T. (2010). Extraction of cobalt from laterite ores by citric acid in presence of ammonium bifluoride. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20(8), 1517–1520.
- [2] Sunnatov, J. B., Qarshiyev, H. K., & Shaymanov, I. I. (2022). Kobalt saqlagan keklarni gidrometallurgik qayta ishlash usullarini o'rganish va tahlil qilish. Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences, 2(5), 166–173.
- [3] Qarshiyev, H. K., Xasanov, A. S., Murashkeyevich, S. M., & Abdiyeva, M. M. (2024). Kobalt-nikel kekini tanlab eritishning maqbul parametrlarini tadqiq qilish. Sanoatda raqamli texnologiyalar / Цифровые технологии в промышленности, 2(4), 20–24. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.2.4.2024.059>
- [4] Sunnatov, J. B., Qarshiyev, H. K., Munosibov, S. M., Xaydaraliyev, X. R., & Yakubov, M. M. Kobalt-nikelli keklarni qayta ishlashning zamonaviy texnologiyalarini tadqiq qilish. Kompozitsion materiallar. (Manba ma'lumotlari to'liq emas.)
- [5] Qarshiyev, H. K., & Shaymanov, I. I. (2021). Rux ishlab chiqarish zavodida hosil bo'layotgan oraliq mahsulotlardan kobaltni ajratib olish imkoniyatlarini o'rganish. Science and Education, 2(3), 142–146.
- [6] Li, Q., Zhang, B., Min, X. B., & Shen, W. Q. (2013). Acid leaching kinetics of zinc plant purification residue. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23(9), 2786–2791.
- [7] Behnajady, B., & Moghaddam, J. (2015). Statistical evaluation and optimization of zinc electrolyte hot purification process by Taguchi method. Journal of Central South University, 22(6), 2066–2072.
- [8] Boyanov, B. S., Konareva, V. V., & Kolev, N. K. (2004). Purification of zinc sulfate solutions from cobalt and nickel through activated cementation. Hydrometallurgy, 73(1), 163–168.
- [9] Nelson, A., Demopoulos, G. P., & Houlachi, G. (2000). The effect of solution constituents and novel activators on cobalt cementation. Canadian Metallurgical Quarterly, 39(2), 175–186.
- [10] Yakubov, M. M., Sunnatov, J. B., Qarshiyev, H. K., & Shaymanov, I. I. (2022). Kobalt saqlagan keklarni qayta ishlashning zamonaviy ahvoli va usullari. Science and Education, 3(5), 474–481.

- [11] Каршиев, Х. К., Мурашкевич, С. М., & Ахмедова, Н. Э. (2025). Современное состояние производства кобальта и исследование методов извлечения кобальта из металлургических отходов. *Universum: технические науки*, 2(5), 62–70.
- [12] Stanojević, D., Nikolić, B., & Todorović, M. (2000). Evaluation of cobalt from cobaltic waste products from the production of electrolytic zinc and cadmium. *Hydrometallurgy*, 54(2), 151–160.
- [13] Behnajady, B., & Moghaddam, J. (2017). Selective leaching of zinc from hazardous arsenic-bearing zinc plant purification filter cake. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 564–574.
- [14] Gouvea, L. R., & Morais, C. A. (2007). Recovery of zinc and cadmium from industrial waste by leaching/cementation. *Minerals Engineering*, 20(9), 956–958.
- [15] Wang, Y., & Zhou, C. (2002). Hydrometallurgical process for recovery of cobalt from zinc plant residue. *Hydrometallurgy*, 63(3), 225–234.
- [16] Ashtari, P., & Pourghahramani, P. (2018). Hydrometallurgical recycling of cobalt from zinc plants residue. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(1), 155–166.
- [17] Karshiev, K., Ergashev, M., Mirzanova, Z., & Karshiboyev, S. (2025). Current state of oxidative precipitation of cobalt and study of factors affecting the oxidative precipitation process. *Universum: технические науки*, 4(7(136)), 5–10. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2025.136.7.20554>
- [18] Hong, T. (2003). Study on the separation of zinc and cobalt from cobalt slag by oxidation precipitation. *Xi'an University of Architecture and Technology*, 227–234.
- [19] Guo, Y. H. (2000). Discussion of the redox reaction mechanism of inorganic oxygen-containing acid. *Journal of Higher Correspondence Education (Natural Science)*, (2), 42–44.
- [20] Liu, C. X., Wang, J. K., Xie, G., & Yang, D. J. (2007). Upgrading of cobalt from cobalt–nickel slag by sodium persulfate oxidation. *Hydrometallurgy of China*, (3), 154–162.
- [21] Liu, Q. J. (2013). Enriched of cobalt from zinc plant purification residue by sodium persulfate oxidation. *Nonferrous Metallurgy of China*, 42(2), 58–60.
- [22] Zhang, Y. F. (2012). Experimental study on the oxidation of cobalt by sodium persulfate. *Xinjiang Non-Ferrous Metals*, 35(Suppl. 1), 81–82.
- [23] Güler, E., & Seyrankaya, A. (2016). Precipitation of impurity ions from zinc leach solutions with high iron contents: A special emphasis on cobalt precipitation. *Hydrometallurgy*, 164, 118–124.
- [24] Chivot, J., Mendoza, L., Mansour, C., Pauporté, T., & Cassir, M. (2008). New insight in the behaviour of Co–H₂O system at 25–150 °C, based on revised Pourbaix diagrams. *Corrosion Science*, 50, 62–69.
- [25] Liu, W., Zhang, R., Liu, Z., & Li, C. (2016). Removal of chloride from simulated zinc sulfate electrolyte by ozone oxidation. *Hydrometallurgy*, 160, 147–151.
- [26] Li, L. B., Xue, J. Q., Hong, T., Yang, J., & Wang, X. (2011). Separation of cobalt from zinc sulfate solution by novel oxidant. In H. S. Kim, J. F. Yang, C. H. Han, S. C. Thongtem, & S. W. Lee (Eds.), *Eco-Materials Processing and Design XII* (pp. 145–148). Trans Tech Publications.
- [27] Tian, Q., Xin, Y., Yao, B., & Guo, X. (2013). Efficient purification of trace cobalt in zinc hydrometallurgical process by ozone oxidation. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 23(4), 1140–1144.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Эшонкулов, У. Х., Хасанов, А. С., & Каршиев, Х. К. (2026). Современные технологии гидрометаллургической переработки кобальтосодержащих кеков. *Цифровые технологии в промышленности*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.7>
