

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НИКЕЛЕВЫХ РУД НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Г.В. Попов, М.И. Попова,

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), Петропавловск-Камчатский, Россия*

Аннотация. В работе дан критический анализ источников, обобщение фактического и теоретического материала по основным гидрометаллургическим технологиям переработки никелевых руд. Установлено, что использование автоклавного выщелачивания руд является наиболее распространённым способом переработки. Этот процесс протекает преимущественно в емкостных реакторах с перемешивающим устройством. Выявлено, что в зависимости от типа руды существуют два основных способа осуществления автоклавного выщелачивания: кислотное выщелачивание под высоким давлением и процесс Карона (аммиачное выщелачивание при обжиге). Обзор показывает, что сернокислотное выщелачивание преимущественно применяют на Кубе и в Западной Австралии, а также в Финляндии, ЮАР и Канаде. Азотнокислотное выщелачивание используют на экспериментальных установках в Австралии на объекте CSIRO. Хлорное выщелачивание применяют в Японии, Норвегии, Франции и Канаде. Аммиачные процессы реализованы на Кубе, в Чехии и в Австралии, а также в Бразилии, Канаде и на Филиппинах, в Индии и на острове Гаг в Индонезии. В статье представлены последние достижения в области извлечения никеля и кобальта из продуктивных растворов, а также достоинства и недостатки существующих схем на действующих предприятиях в мире. Проанализировав основные технологии переработки никелевой руды, можно сказать, что традиционно Ni и Co извлекаются из продуктивных растворов после выщелачивания одним из трех способов: 1. Осаждение смешанного сульфида никеля и кобальта; 2. Осаждение смешанного гидроксида никеля и кобальта; 3. Прямая экстракция растворителем. Анализ показал, что наиболее оптимальным и наименее продолжительным процессом, обеспечивающий сравнительно высокую степень извлечения целевых металлов является экстракция. Удаление примесей наиболее целесообразно проводить осаждением, однако при этом стоит учитывать потери никеля и кобальта.

Ключевые слова: автоклавное выщелачивание; биовыщелачивание; сульфидная руда; латеритная руда; никель; кобальт; продуктивные растворы.

WORLD TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES OF HYDROMETALLURGICAL PROCESSING OF NICKEL ORES AT OPERATING ENTERPRISES

G.V. Popov, M.I. Popova,

*Federal State Budgetary Institution of Science Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian
Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Abstract: The paper provides a critical analysis of sources, a generalization of factual and theoretical material on the main hydrometallurgical technologies for processing nickel ores. It has been established that the use of autoclave leaching of ores is the most common method of processing. This process takes place mainly in capacitive reactors with a stirrer. It was found that, depending on the type of ore, there are two main ways to carry out autoclave leaching: acid leaching under high pressure and the Caron process (ammonia leaching during roasting). The review shows that sulfuric acid leaching is predominantly used in Cuba and Western Australia, as well as in Finland, South Africa and Canada. Nitric acid leaching is being used in pilot plants in Australia at the CSIRO facility. Chlorine leaching is used in Japan, Norway, France and Canada. Ammonia processes have been implemented in Cuba, the Czech Republic and Australia, as well as in Brazil, Canada and the Philippines, India and Gag Island in Indonesia. The article presents the latest achievements in the field of extraction of nickel and cobalt from productive solutions, as well as the advantages and disadvantages of existing schemes at operating enterprises in the world. Having analyzed the main technologies for processing nickel ore, we can say that traditionally Ni and Co are extracted from productive solutions after leaching in one of three ways: 1. Precipitation of mixed nickel and cobalt sulfide; 2. Precipitation of mixed nickel and cobalt hydroxide; 3. Direct solvent extraction. The analysis showed that the most optimal and least time-consuming process, providing a relatively high degree of extraction of target metals, is extraction. Impurity removal is most expediently carried out by precipitation, however, the loss of nickel and cobalt should be taken into account.

Keywords: autoclave leaching; bioleaching; sulfide ore; laterite ore; nickel; cobalt; productive solutions.

Никель является важным металлом с общим мировым потреблением около 2 миллионов тонн в год, которое быстро растет [1, 2]. Никель используется в сплавах из нержавеющей стали, гальванических покрытиях, мобильных телефонах, ювелирных изделиях, производстве электроэнергии, суперсплавах и т.д. [3]. Запасы никеля сосредоточены в сульфидной и латеритной руде.

Кобальт обладает уникальными свойствами, которые применяют в различных отраслях промышленности [1]. Он нашел широкое применение в качестве катализатора, а также его используют в качестве добавок в сплавах, что придает им прочность и коррозионную стойкость. Кроме того, кобальт может быть использован для производства постоянных магнитов. Вследствие этих уникальных физических свойств, в том числе прочности и магнитных свойств, кобальт имеет широкий спектр применений. Основная часть мирового производства кобальта приходится как побочный продукт извлечения других металлов, в основном никеля и меди. Источником служат самые разные типы месторождений, в основном медно-кобальтовые отложения, никель-кобальтовые латериты и никель-медно-кобальтовые сульфиды или гидротермальные вулканогенные месторождения.

Кобальт и никель извлекаются в мире как из первичных (горнодобывающих) так и вторичных ресурсов, но их производство не может удовлетворить текущий спрос на мировом рынке. По данным [1, 3, 4] прогнозируется, что спрос на никель увеличится на 200–300% к 2050 году во всем мире. Как и в случае с Ni, к 2050 году прогнозируется существенное увеличение спроса и на кобальт [1, 3, 4]. Основным по запасам источником никеля и кобальта являются силикатные никелевые и кобальтовые руды коры выветривания. В латеритных рудах высокое содержание никеля — около 70% и кобальта — 36%. На силикатные никелевые месторождения коры выветривания приходится около 63% мировых запасов Ni и 58% Co. К ведущим месторождениям относят месторождения в Новой Каледонии, России, Казахстане, Бразилии, Индонезии, Кубы и Филиппины. В ближайшем будущем будет возможна добыча никеля и кобальта из латеритных руд Польши и Греции [1, 5].

К перспективным ресурсам относят месторождения латеритных никелевых руд в Австралии [1]. Вторым важнейшим в настоящее время источником никеля и кобальта служат магматогенные сульфидные руды. При извлечении целевого компонента никеля, кобальт является сопутствующим продуктом, который представляет огромный экономический интерес. Сульфидные руды, добываемые для получения Ni и Co, содержат от 1,5 до 3,0% Ni и 0,05–1,0% Co. На сульфидные медно-никелевые месторождения приходится около 37% мировых запасов никеля и более 10% кобальта [6, 7]. Ведущими месторождениями сульфидных руд являются месторождения России, Канады, Австралия, ЮАР и Финляндия [1].

В промышленности для получения Ni и Co из руды применяют либо пирометаллургическую, либо гидрометаллургическую переработку.

Переработка руд пирометаллургическими способами требует повышенной температуры процесса, который сопро-

вождается выделением в атмосферу загрязняющих веществ. Существенными недостатками являются высокие капитальные затраты и нерентабельность обработки низкосортной руды. Извлечение металлов из руды сопровождается большим количеством отходов, в которых содержатся значительные концентрации металлов.

Гидрометаллургические способы получили широкое применение в промышленности. В отличие от пирометаллургии, гидрометаллургическая переработка обычно требует меньших капитальных затрат при удельной производительности металла и позволяет избежать проблем с выбросами газов и пыли, имеющих место при пирометаллургической переработке [1, 8]. Гидрометаллургическая переработка сложных руд и концентратов приобретает все большее значение, поскольку горнодобывающая и металлургическая промышленность стремится разрабатывать месторождения полезных ископаемых, которые трудно перерабатывать с использованием традиционных технологий обогащения полезных ископаемых и пирометаллургических технологий [8].

Био- гидрометаллургические процессы для горнодобывающей промышленности имеют меньшие эксплуатационные расходы, чем у конкурирующих технологий, поэтому экономичны в реализации по сравнению с другими процессами.

Цель исследований: проведение анализа источников, обобщение фактического и теоретического материала по основным гидрометаллургическим технологиям переработки никелевых руд.

Методы исследований. Использовались такие методы исследования как обобщение и анализ.

Результаты исследований.

Основная часть.

В гидрометаллургии выделяют технологию автоклавного выщелачивания руд. При автоклавном выщелачивании пульпа нагревается в автоклаве в среде воздуха или кислорода при избыточном давлении [1, 8, 9]. Температура выщелачивания варьируется от 60 до 300 °С, а давление от 0,2 до 1,5 МПа. Процесс автоклавного выщелачивания протекает преимущественно в емкостных реакторах с перемешивающим устройством. В промышленности встречаются автоклавы двух типов: с поверхностным нагревом и механическим перемешиванием и с применением перемешивания и нагрева острым паром [2]. Поскольку процесс происходит в герметичных аппаратах, то данный способ наиболее экологически чистый. На первой стадии процесса руду измельчают и обжигают, что переводит минералы в более растворимые соединения [9]. Извлечение из руды металлов происходит при помощи растворов кислот или щелочей.

В зависимости от типа руды существуют два основных способа гидрометаллургической переработки: кислотное выщелачивание под высоким давлением для лимонитовых руд и процесс Карона (аммиачное выщелачивание при обжиге) для лимонита или смешанных сапролит-лимонитовых руд [2, 9, 10, 11, 12, 13]. В качестве кислоты используют H_2SO_4 или HNO_3 . Возможно использование и соляной кислоты HCl. При щелочном выщелачивании используют растворы NH_3 или NaOH и KOH. После выщелачивания смесь фильт-

руется для отделения твердой фазы от жидкой [10]. Преимущество кислотного выщелачивания под высоким давлением заключается в том, что технология не столь избирательна по отношению к типу рудных минералов, сортам и характеру минерализации [9]. Недостатком является энергия, необходимая для нагрева руды и кислоты [14].

Процесс, включающий сернокислотное выщелачивание под высоким давлением применяется для месторождений:

- 1) месторождения округа Моа на Кубе и юго-восточной Новой Каледонии в Горо;
- 2) месторождения в Западной Австралии (Месторождение Муррин-Муррин, месторождение Кос, Месторождение Булонг).

Кислотное выщелачивание под давлением используют на предприятиях Moa Bay, Cawse, Bulong, Murrin Murrin, Coral Bay, Ravensthorpe, Ramu, Goro и Ambatovy [9, 10]. Кобальт и никель растворяются во время кислотного выщелачивания. Соотношение Ni-Co в латеритах обычно превышает 10:1, что делает кобальт наиболее ценным компонентом в руде по сравнению с никелем [14].

На заводах Pedro Soto Alba (Moa Bay Mining Company, Куба) и Copper Cliff (Канада), в ЮАР, на заводе в Хельсинки (Финляндия) применяют способ автоклавного сернокислотного выщелачивания латеритов при давлении 3200-4600 кПа [15] и концентрации H_2SO_4 100-125 г/дм³, при этом достигается высокое извлечение никеля и кобальта (95-96 %). Кислотное выщелачивание под давлением применяют и на новых заводах, построенных на Филиппинах, в Индонезии, Австралии, Новой Каледонии (проект Goro) [9]. Всего в мире работает несколько десятков автоклавных установок для выщелачивания кобальта и никеля из флотационных концентратов, штейнов и полупродуктов. В настоящее время в России никель по такой схеме не производят. Это связано с неприменимостью существующих технологий для большинства российских руд с повышенным содержанием магния [16].

Другой способ извлечения никеля из латеритных руд в настоящее время демонстрируется на экспериментальной испытательной установке на объекте CSIRO в Перте, Австралия [9, 14, 17, 18]. В процессе азотнокислого гидрометаллургического выщелачивания вместо серной кислоты используется азотная кислота [11]. Основным преимуществом процесса является возможность обработки латеритных руд как лимонита, так и сапролита, и, по оценкам, капитальные и эксплуатационные затраты составляют менее половины капитальных и эксплуатационных затрат процессов кислотного выщелачивания под высоким давлением. Основным недостатком является удаление значительного количества растворенного алюминия.

Существенными преимуществами хлорного выщелачивания по сравнению с сернокислым являются возможность использования более концентрированных растворов в связи с высокой растворимостью хлоридов, низкая температура выщелачивания (60-150°C), высокая эффективность регенерации выщелачивающего агента, превращение сульфидной серы в элементарную и исключение необходимости перевода сульфатов в побочные продукты технологии (сульфат аммония или натрия), низкие энергозатраты на стадии электролиза растворов, обусловленные их высокой проводимостью. Хлорное выщелачивание применяют в Японии (завод

Ниихама), Норвегии (завод в г. Кристиансанн), Франции (завод Санувиль) и Канаде (завод Фалконбридж).

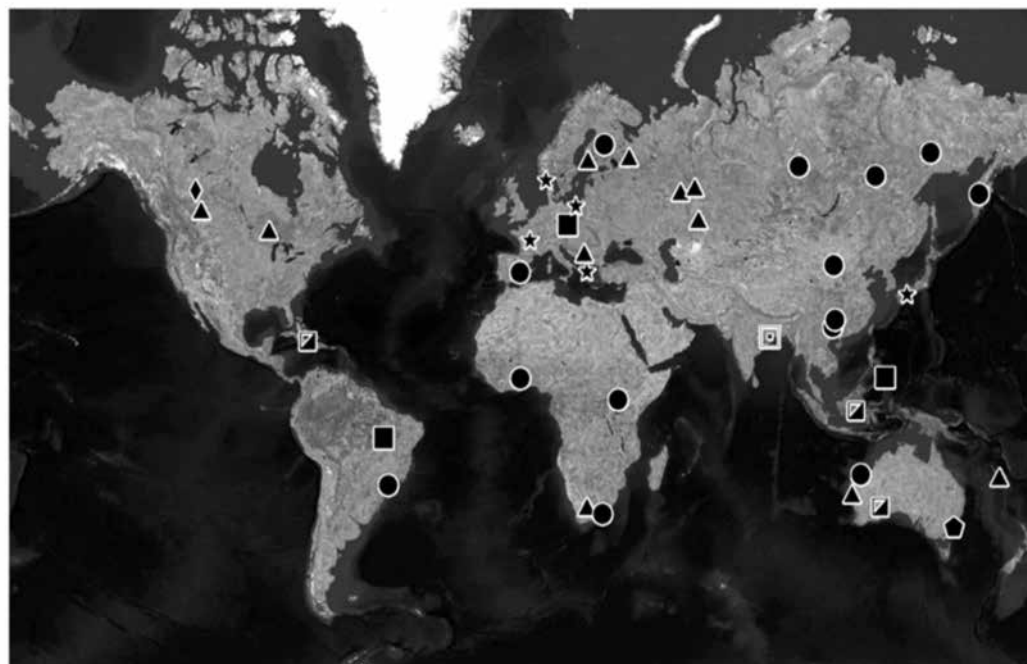
Одной из разновидностей автоклавного процесса является аммиачное выщелачивание. Технологическая схема процесса включает аммиачное выщелачивание концентрата при 77-82°C и давлении 0,7 МПа с переходом в раствор никеля, меди и кобальта с последующим нагревом раствора до 110°C. Далее следует последовательное автоклавное восстановление водородом (H_2) никеля и осаждение кобальта сероводородом (H_2S), кристаллизацию сульфата аммония $((NH_4)_2SO_4)$ из отработанного раствора. Извлечение металлов составляет: 90% Ni; 45% Co; 89% Cu. Автоклавной переработкой сульфидных никелевых концентратов по аммиачной схеме получают сульфид меди (70% Cu), никелевый порошок (99,8-99,9% Ni), кобальтовый порошок и сульфат аммония $((NH_4)_2SO_4)$. При использовании аммиачного раствора происходит очистка от большинства примесей (Fe, Al, Mn) в растворе. Недостатком щелочного автоклавного выщелачивания является высокий расход щелочи и более низкая степень извлечения в сравнении с сернокислым [12]. Аммиачные процессы реализованы на Кубе (заводы Rene Ramos Latour и Eг. Che Gueavara), в Чехии (завод Николова Гута) и в Австралии (завод Townsville и Куинана), а также в Бразилии (завод Tocantins), Канаде (завод Форт Саскачеван) и на Филиппинах (завод Surigao), в Индии (завод Сукинда) и на острове Гаг в Индонезии. Процесс фирмы Sherritt Gordon в Канаде также включает аммиачное выщелачивание.

Био- гидрометаллургические процессы являются альтернативным путем в гидрометаллургических процессах, которые используются для извлечения металлов, особенно меди, никеля и кобальта, из низкосортных руд и концентратов [13], благодаря меньшему негативному воздействию на окружающую среду. Кучное (атмосферное) выщелачивание намного дешевле, но оно несколько ограничено в выборе типов руды, которую можно обрабатывать. На различных заводах успешно применяют био- гидрометаллургическую переработку, например: на шахте Talvivaara, расположенной в Sotkamo, Финляндия [19], на шахте Radio Hill, Западная Австралия [20], в Испании с применением медно-никелевого концентрата [21], в России (Камчатский край, Красноярский край и Якутия) и Китае (месторождения Nami, Junchuan, Mojiang и Zinchuan), Уганде (Kilembe).

Одним из недостатков, при использовании автоклавного выщелачивания является дорогая и сложная аппаратура, которая к тому же быстро подвергается коррозии. Кроме того, при автоклавной технологии переработки руды расходуется большой объем пара и возникают проблемы отвода избыточного тепла. Все это делает процесс значительно более сложным и менее экономичным. На рис. 1 показаны основные месторождения, на которых применяют выщелачивание никелевых руд.

На рис. 2 представлены основные технологические процессы переработки разных типов руды.

При переработке Cu-Co руд, первым этапом обычно идет дробление руды, затем она перерабатывается по индивидуальным технологическим схемам, которые зависят от типа добываемой руды [1, 2, 3, 4, 17]. Для оксидных медно-кобальтовых руд используют кислотное выщелачивание. После выщелачивания идет удаление примесей, таких



Условные обозначения:

- - Биовыщелачивание; ■ - Аммиачное выщелачивание; ▲ - Сернокислотное выщелачивание;
- ◆ - Азотнокислотное выщелачивание; ★ - Хлорное выщелачивание; □ - Аммиачное и биовыщелачивание;
- ◊ - Аммиачное и хлорное выщелачивание; ▢ - Аммиачное и сернокислотное выщелачивание.

Рис. 1. Основные месторождения, на которых используют выщелачивание никелевых руд / Fig. 1. The main deposits that use the leaching of nickel ores.

как железо, цинк и марганец с помощью экстракции растворителем. После удаления примесей кобальт обычно осаждается в качестве промежуточного продукта (гидроксида кобальта). Электрообработку можно применять непосредственно после удаления примесей, чтобы обеспечить более высокую степень разделения кобальта и других элементов. Это приводит к получению более ценного продукта и меньшим потерям кобальта. Процесс выщелачивания разработан для максимального извлечения меди, в отличие от кобальта. В результате извлечение кобальта часто составляет менее 75% [1]. Для переработки сульфидных медно-кобальтовых руд применяют флотацию. Флотационное извлечение оксидных руд достигает около 60% для меди и около 45% для кобальта [1]. Если конечным продуктом является кобальт, то для сульфидных руд применяют выщелачивание при обжиге.

Для переработки латеритных руд используют пирометаллургические и гидрометаллургические процессы [1, 3, 4, 17]. Состав никелевой латеритной руды обычно сильно варьируется в зависимости от глубины залегания. Минералы, богатые железом, находятся ближе к поверхности, а минералы, богатые магнием, - ниже. Пирометаллургию в основном используют для получения ферроникеля. При кислотном выщелачивании руда сначала выщелачивается при высоком давлении и температуре в автоклаве, а затем подвергается нейтрализации и разделению твердого вещества и жидкости с помощью противоточной декантации. Затем полученный насыщенный раствор можно подвергнуть нескольким стадиям очистки для удаления загрязняющих веществ (в основном железа, магния, алюминия и меди) и обработать газообразным сероводородом для осаждения смешанного сульфида

никеля и кобальта. Кобальт и никель также может быть извлечен путем осаждения гидроксида никеля и кобальта. Далее идет стадия повторного выщелачивания и экстракции никеля. В промышленности кобальт перерабатывается путем восстановления водородом и получением кобальтового порошка или же электрообработкой для производства кобальтовых катодов. Второй способ (процесс Карона) включает обжиг с последующим выщелачиванием аммиаком. После разделения твердого вещества и жидкости следует экстракции растворителем, для извлечения никеля. Кобальт осаждается в виде сульфида кобальта, а никель извлекается в виде карбоната никеля.

Переработка магматогенных кобальт-медно-никелевых сульфидных руд включает дробление и измельчение с последующей пенной флотацией для получения никель-кобальтового сульфидного концентрата [1, 3, 4, 17]. Обычно никель и кобальт отделяют от меди в схеме флотации. Затем концентрат плавят и превращают в штейн с низким содержанием железа. Затем полученный штейн очищают до никеля и кобальта высокой чистоты гидрометаллургическим способом. Можно использовать выщелачивание хлором в соляной кислоте, или воздухом в растворах аммиака, или кислородом в серной кислоте. После экстракции растворителем металлический кобальт получают электролитическим извлечением или восстановлением водородом из очищенных растворов выщелачивания.

Результаты исследований.

Проанализировав основные технологии переработки никелевой руды, можно сказать, что традиционно Ni и Co извлекаются из продуктивных растворов после выщелачивания одним из трех способов:

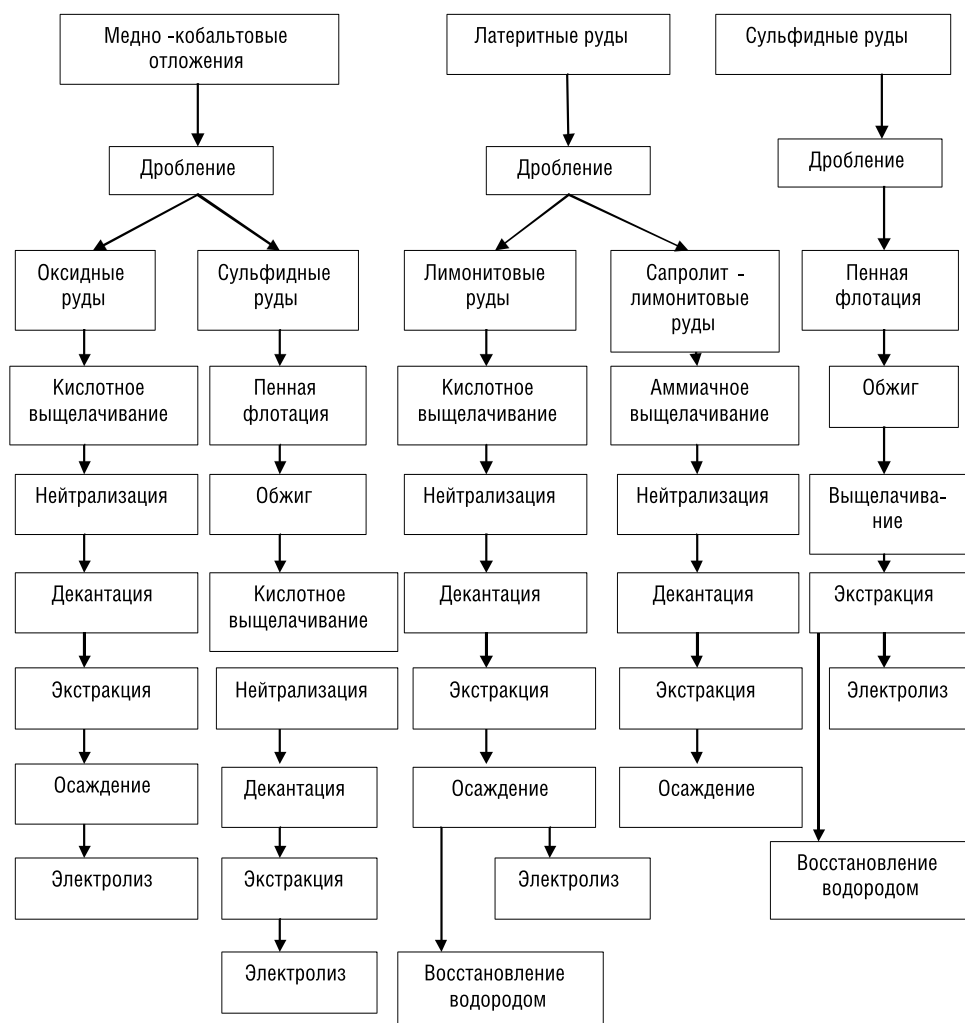


Рис. 2. Основные технологические пути переработки руды [1] / Fig. 2. The main technological ways of ore processing [1].

Таблица 1 / Table 1

Сравнение процессов извлечения Ni и Co из растворов / Comparison of processes for extracting Ni and Co from solutions.

Технологический процесс / Technological process	Достоинства / Advantages	Недостатки / Flaws
Жидкостная экстракция	Возможность отделения металла из низкоконцентрированных растворов; Высокая чистота продуктов; Возможность строительства небольших (также мобильных) установок	Трудности при комплексном извлечении различных металлов; Разложение органической фазы во время экстракции; Токсичность некоторых растворителей; Перенос примесей на поверхность раздела
Мембранная экстракция	Стабильность и долговременная производительность; Устранение необходимости разделения фаз	Более низкий выход, чем при жидкостной экстракции; Проблемы со стабильностью давления; Необходимость сборки множества высокочастотных модулей; Стоимость и загрязнение мембран
Осаждение	Простой способ и оборудование	Хранение осадков; Совместное осаждение; Низкая селективность; Большой расход реактивов; Негативные экологические последствия удаления осадка; Медленное осаждение металлов
Сорбция	Простой и селективный метод; Техническая и экономическая эффективность; Простота управления	Увеличение объема разбавленных растворов после элюирования; Неселективный и высокочувствительный процесс к pH раствора
Цементация	Низкие температуры и атмосферное давление; Регенерация и рециркуляция сточных вод; Простота управления	Выделение водорода; Потери расходуемой металлической пыли
Электролиз	Высокая чистота металлического продукта	Необходимость очистки и обогащения перед электролизом; Выделение водорода; Высокая стоимость

1. Осаждение смешанного сульфида никеля и кобальта;
2. Осаждение смешанного гидроксида никеля и кобальта;
3. Прямая экстракция растворителем.

Затем Ni и Co отделяют друг от друга и извлекают из полученных растворов восстановлением, электрохимическим выделением или осаждением. Ключевым этапом во всех технологических схемах является нейтрализация смеси после выщелачивания с использованием щелочи, такой как известняк, для нейтрализации остаточной серной кислоты и осаждения примесей трехвалентных металлов. Выделение железа, трудно реализуемая задача из-за соосаждения и последующего разделения полученных растворов. Отдельное разделение/извлечение Ni и Co из растворов затруднено, поскольку их физическое и химическое поведение схожи. Поэтому разделение и извлечение этих металлов представляет интерес для многих исследователей [3, 14].

В табл. 1 сведены достоинства и недостатки существующих процессов извлечения никеля и кобальта из продуктивных растворов.

Исходя из выше изложенного, можно сделать вывод о том, что экстракция растворителем является наиболее предпочтительным способом для извлечения Ni и Co из продуктивных растворов. Она имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами извлечения, используемыми для отделения или удаления металлов. Экстракция требует меньше времени при низких эксплуатационных расходах,

обеспечивает высокую селективность, что приводит к получению продуктов высокой чистоты [1, 2, 3, 4, 17, 22-29].

Заключение.

Удовлетворить будущий спрос на никель и кобальт позволяет комплексный подход добычи и переработки руды. Основным способом, применяемым на действующих предприятиях, является кислотное выщелачивание. Полученные растворы содержат высокие концентрации примесей. Удаление примесей наиболее целесообразно проводить осаждением, однако при этом стоит учитывать потери никеля и кобальта.

Выводы.

1. В статье дан критический анализ источников, обобщение фактического и теоретического материала по основным гидрометаллургическим технологиям переработки никелевых руд.

2. Установлено, что использование кислотного автоклавного выщелачивания руд является наиболее распространённым способом переработки. Анализ показал, что наиболее оптимальным и наименее продолжительным процессом извлечения никеля и кобальта из полученных продуктивных растворов после выщелачивания, обеспечивающий сравнительно высокую степень извлечения целевых металлов является экстракция.

3. Результаты исследований могут быть полезными для дальнейших экспериментальных исследований в области переработки никелевых руд и извлечению никеля и кобальта из полученных продуктивных растворов. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Dehaine Q., Tijsseling L.T., Glass H.J., Tormanen T., Butcher A.R. Geometallurgy of cobalt ores: A review // *Minerals Engineering*. - 2021. - Vol. 160. - P. 400-428.
2. Aliprandini P., Correa M.M.J., Tenorio J.A.S., Espinosa D.C.R. Influence of metallic impurities on solvent extraction of cobalt and nickel from a laterite waste liquor // *The Minerals, Metals & Materials Series*. - 2019. - P. 137-142.
3. Alvial-Hein G., Mahandra H., Ghahreman A. Separation and recovery of cobalt and nickel from end of life products via solvent extraction technique: A review // *Journal of Cleaner Production*. - 2021. - Vol. 297. - P. 125-151.
4. Kaksonen A. H., Boxall N. J., Gumulya Y., Khaleque H. N., Morris C., Bohu T., Cheng K. Y., Usher K. M., Lakaniemi A.-M. Recent progress in biohydrometallurgy and microbial characterization // *Hydrometallurgy*. - 2018. - Vol. 180. - P. 7-25.
5. Janiszewska M., Markiewicz A., Regel-Rosocka M. Hydrometallurgical separation of Co(II) from Ni(II) from model and real waste solutions // *Journal of Cleaner Production*. - 2019. - Vol. 228. - P. 746-754.
6. Deepatana A., Tang J.A., Valix M. Comparative study of chelating ion exchange resins for metal recovery from bioleaching of nickel laterite ores // *Minerals Engineering*. - 2006. - Vol. 19. - P. 1280-1289.
7. Eksteen J.J., Oraby E.A., Nguyen V. Leaching and ion exchange based recovery of nickel and cobalt from a low grade, serpentine-rich sulfide ore using an alkaline glycine lixiviant system // *Minerals Engineering*. - 2020. - Vol. 145. - P. 106-117.
8. Dreisinger D. Keynote address: hydrometallurgical process development for complex ores and concentrates // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. - 2009. - Vol. 109. - P. 253-271.
9. Chong S., Hawker W., Vaughan J. Selective reductive leaching of oxidised cobalt containing residue // *Minerals Engineering*. - 2013. - Vol. 54. - P. 82-87.
10. Abbasi P., McKevitt B., Dreisinger D.B. The kinetics of nickel recovery from ferrous containing solutions using an Iminodiacetic acid ion exchange resin // *Hydrometallurgy*. - 2018. - Vol. 175. - P. 333-339.
11. Hutton-Ashkenny M., Ibana D., Barnard K.R. Reagent selection for recovery of nickel and cobalt from nitric acid nickel laterite leach solutions by solvent extraction // *Minerals Engineering*. - 2015. - Vol. 77. - P. 42-51.
12. Wang L.Y., Lee M.S. Separation of Co(II) and Ni(II) from chloride leach solution of nickel laterite ore by solvent extraction with Cyanex 301 // *International Journal of Mineral Processing*. - 2017. - Vol. 166. - P. 45-52.
13. Mishra R.K., Rout P.C., Sarangi K., Nathsarma K.C. Solvent extraction of zinc, manganese, cobalt and nickel from nickel laterite bacterial leach liquor using sodium salts of TOPS-99 and Cyanex 272 // *Transactions nonferrous metals society of China*. - 2016. - Vol. 26. - P. 301-309.
14. Cheng C.Y., Barnard K.R., Zhang W., Zhu Z., Pranolo Y. Recovery of nickel, cobalt, copper and zinc in sulphate and chloride solutions using synergistic solvent extraction // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. - 2016. - Vol. 24. - P. 237-248.

15. Шнеерсон Я.М., Набойченко С.С. Тенденции развития автоклавной гидрометаллургии цветных металлов // Цветные металлы. - 2011. - № 3. - С. 15-20.
16. Пашков Г.Л., Сайкова С.В., Пантелеева М.В., Сайкова Д.И. Катионообменное выщелачивание окисленных никелевых руд Усть-Порожского месторождения // Цветные металлы. - 2018. - № 8. - С. 52-56.
17. Spooren J., Binnemans K., Bjorkmalm J., Breemers K., Dams Y., Folens K., Gonzalez-Moya M., Horckmans L., Komnits K., Kurylak W., Lopez M., Makinen J., Onisei S., Oorts K., Peys A., Pietek G., Pontikes Y., Snellings R., Tripiana M., Varia J., Willquist K., Yurramendi L., Kinnunen P. Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: technology development trends // Resources, Conservation & Recycling. - 2020. - Vol. 160. - P. 1-18.
18. Cheng C.Y., Urbani M.D., Davies M.G., Pranolo Y., Zhu Z. Recovery of nickel and cobalt from leach solutions of nickel laterites using a synergistic system consisting of Versatic 10 and Acorga CLX 50 // Minerals Engineering. - 2015. - Vol. 77. - P. 17-24.
19. Riekkola-Vanhanen M. Talvivaara black schist bioheapleaching demonstration plant // Advanced Materials Research. - 2007. - Vol. 20. - P. 30-33.
20. Patent № 7,189,527 B2 U.S. Bacterial oxidation of sulphide ores and concentrates. Hunter C. J., Williams T. L., Purkiss S. A. R., Chung L. W.-C., Connors E., Gilders R. D. 2007. 8p.
21. Gericke M., Govender Y. Bioleaching strategies for the treatment of nickel-copper sulphide concentrates // Minerals Engineering. - 2011. - Vol. 24. - P. 1106-1112.
22. Santanilla A.J.M., Aliprandini P., Benvenuti J., Tenorio J.A.S., Espinosa D.C.R. Structure investigation for nickel and cobalt complexes formed during solvent extraction with the extractants Cyanex 272, Versatic 10 and their mixtures // Minerals Engineering. - 2021. - Vol. 160. - P. 563-563.
23. Junior A.B.B., Dreisinger D.B., Espinosa D.C.R. A review of nickel, copper, and cobalt recovery by chelating ion exchange resins from mining processes and mining tailings // Mining, Metallurgy & Exploration. - 2019. - Vol. 36. - P. 199-213.
24. Littlejohn P., Vaughan J. Recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings through resin-in-pulp scavenging and selective ammoniacal elution // Minerals Engineering. - 2013. - Vol. 54. - P. 14-20.
25. Littlejohn P., Vaughan J. Selective elution of nickel and cobalt from iminodiacetic acid cation exchange resin using ammoniacal solutions // Hydrometallurgy. - 2014. - Vol. 141. - P. 24-30.
26. Mendes F.D., Martins A.H. Selective sorption of nickel and cobalt from sulphate solutions using chelating resins // International Journal of Mineral Processing. - 2004. - Vol. 74. - P. 359-371.
27. Ramachandra B. Process for the recovery of cobalt and nickel from sulphate leach liquors with saponified Cyanex 272 and D2EHPA // Separation Science and Technology. - 2007. - Vol. 42. - P. 2067-2080.
28. Zainol Z., Nicol M.J. Comparative study of chelating ion exchange resins for the recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings // Hydrometallurgy. - 2009. - Vol. 96. - P. 283-287.
29. Zante G., Boltoeva M., Masmoudi A., Barillon R., Trebouet D. Selective separation of cobalt and nickel using a stable supported ionic liquid membrane // Separation and Purification Technology. - 2020. - Vol. 252. - P. 117-128.

REFERENCES

1. Dehaine Q., Tijsseling L.T., Glass H.J., Tormanen T., Butcher A.R. Geometallurgy of cobalt ores: A review // Minerals Engineering. - 2021. - Vol. 160. - P. 400-428.
2. Aliprandini P., Correa M.M.J., Tenorio J.A.S., Espinosa D.C.R. Influence of metallic impurities on solvent extraction of cobalt and nickel from a laterite waste liquor // The Minerals, Metals & Materials Series. - 2019. - P. 137-142.
3. Alvial-Hein G., Mahandra H., Ghahreman A. Separation and recovery of cobalt and nickel from end of life products via solvent extraction technique: A review // Journal of Cleaner Production. - 2021. - Vol. 297. - P. 125-151.
4. Kaksonen A. H., Boxall N. J., Gumulya Y., Khaleque H. N., Morris C., Bohu T., Cheng K. Y., Usher K. M., Lakaniemi A.-M. Recent progress in biohydrometallurgy and microbial characterization // Hydrometallurgy. - 2018. - Vol. 180. - P. 7-25.
5. Janiszewska M., Markiewicz A., Regel-Rosocka M. Hydrometallurgical separation of Co(II) from Ni(II) from model and real waste solutions // Journal of Cleaner Production. - 2019. - Vol. 228. - P. 746-754.
6. Deepatana A., Tang J.A., Valix M. Comparative study of chelating ion exchange resins for metal recovery from bioleaching of nickel laterite ores // Minerals Engineering. - 2006. - Vol. 19. - P. 1280-1289.
7. Eksteen J.J., Oraby E.A., Nguyen V. Leaching and ion exchange based recovery of nickel and cobalt from a low grade, serpentine-rich sulfide ore using an alkaline glycine lixiviant system // Minerals Engineering. - 2020. - Vol. 145. - P. 106-117.
8. Dreisinger D. Keynote address: hydrometallurgical process development for complex ores and concentrates // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. - 2009. - Vol. 109. - P. 253-271.
9. Chong S., Hawker W., Vaughan J. Selective reductive leaching of oxidised cobalt containing residue // Minerals Engineering. - 2013. - Vol. 54. - P. 82-87.
10. Abbasi P., McKevitt B., Dreisinger D.B. The kinetics of nickel recovery from ferrous containing solutions using an Iminodiacetic acid ion exchange resin // Hydrometallurgy. - 2018. - Vol. 175. - P. 333-339.
11. Hutton-Ashkeny M., Ibana D., Barnard K.R. Reagent selection for recovery of nickel and cobalt from nitric acid nickel laterite leach solutions by solvent extraction // Minerals Engineering. - 2015. - Vol. 77. - P. 42-51.
12. Wang L.Y., Lee M.S. Separation of Co(II) and Ni(II) from chloride leach solution of nickel laterite ore by solvent extraction with Cyanex 301 // International Journal of Mineral Processing. - 2017. - Vol. 166. - P. 45-52.
13. Mishra R.K., Rout P.C., Sarangi K., Nathsarma K.C. Solvent extraction of zinc, manganese, cobalt and nickel from nickel laterite bacterial leach liquor using sodium salts of TOPS-99 and Cyanex 272 // Transactions nonferrous metals society of China. - 2016. - Vol. 26. - P. 301-309.

14. Cheng C.Y., Barnard K.R., Zhang W., Zhu Z., Pranolo Y. Recovery of nickel, cobalt, copper and zinc in sulphate and chloride solutions using synergistic solvent extraction // Chinese Journal of Chemical Engineering. - 2016. - Vol. 24. - P. 237-248.
15. SHneerson YA.M., Nabojchenko S.S. Development trends of autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals // Non-ferrous metals. - 2011. - № 3. - P. 15-20.
16. Pashkov G.L., Sajkova S.V., Panteleeva M.V., Sajkova D.I. Cation-exchange leaching of oxidized nickel ores of the Ust-Porozhinsky deposit // Non-ferrous metals. - 2018. - № 8. - P. 52-56.
17. Spooren J., Binnemans K., Bjorkmalm J., Breemers K., Dams Y., Folens K., Gonzalez-Moya M., Horckmans L., Komnits K., Kurylak W., Lopez M., Makinen J., Onisei S., Oorts K., Peys A., Pietek G., Pontikes Y., Snellings R., Tripiana M., Varia J., Willquist K., Yurramendi L., Kinnunen P. Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: technology development trends // Resources, Conservation & Recycling. - 2020. - Vol. 160. - P. 1-18.
18. Cheng C.Y., Urbani M.D., Davies M.G., Pranolo Y., Zhu Z. Recovery of nickel and cobalt from leach solutions of nickel laterites using a synergistic system consisting of Versatic 10 and Acorga CLX 50 // Minerals Engineering. - 2015. - Vol. 77. - P. 17-24.
19. Riekkola-Vanhanen M. Talvivaara black schist bioheapleaching demonstration plant // Advanced Materials Research. - 2007. - Vol. 20. - P. 30-33.
20. Patent № 7,189,527 B2 U.S. Bacterial oxidation of sulphide ores and concentrates. Hunter C. J., Williams T. L., Purkiss S. A. R., Chung L. W.-C., Connors E., Gilders R. D. 2007. 8p.
21. Gericke M., Govender Y. Bioleaching strategies for the treatment of nickel-copper sulphide concentrates // Minerals Engineering. - 2011. - Vol. 24. - P. 1106-1112.
22. Santanilla A.J.M., Aliprandini P., Benvenuti J., Tenorio J.A.S., Espinosa D.C.R. Structure investigation for nickel and cobalt complexes formed during solvent extraction with the extractants Cyanex 272, Versatic 10 and their mixtures // Minerals Engineering. - 2021. - Vol. 160. - P. 563-563.
23. Junior A.B.B., Dreisinger D.B., Espinosa D.C.R. A review of nickel, copper, and cobalt recovery by chelating ion exchange resins from mining processes and mining tailings // Mining, Metallurgy & Exploration. - 2019. - Vol. 36. - P. 199-213.
24. Littlejohn P., Vaughan J. Recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings through resin-in-pulp scavenging and selective ammoniacal elution // Minerals Engineering. - 2013. - Vol. 54. - P. 14-20.
25. Littlejohn P., Vaughan J. Selective elution of nickel and cobalt from iminodiacetic acid cation exchange resin using ammoniacal solutions // Hydrometallurgy. - 2014. - Vol. 141. - P. 24-30.
26. Mendes F.D., Martins A.H. Selective sorption of nickel and cobalt from sulphate solutions using chelating resins // International Journal of Mineral Processing. - 2004. - Vol. 74. - P. 359-371.
27. Ramachandra B. Process for the recovery of cobalt and nickel from sulphate leach liquors with saponified Cyanex 272 and D2EHPA // Separation Science and Technology. - 2007. - Vol. 42. - P. 2067-2080.
28. Zainol Z., Nicol M.J. Comparative study of chelating ion exchange resins for the recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings // Hydrometallurgy. - 2009. - Vol. 96. - P. 283-287.
29. Zante G., Boltova M., Masmoudi A., Barillon R., Trebouet D. Selective separation of cobalt and nickel using a stable supported ionic liquid membrane // Separation and Purification Technology. - 2020. - Vol. 252. - P. 117-128.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Григорий Васильевич:

научный сотрудник,
Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(НИГТЦ ДВО РАН),
г. Петропавловск-Камчатский, Россия,
e-mail: Popovg.v@yandex.ru

Попова Марина Ивановна:

аспирант,
Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(НИГТЦ ДВО РАН),
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Popov Grigory Vasilievich:

Researcher,
Federal State Budgetary Institution of Science Research
Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian
Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,
e-mail: Popovg.v@yandex.ru

Popova Marina Ivanovna:

post-graduate student,
Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.