

ПРОИЗВОДСТВО НИКЕЛЯ

Андрей Владимирович Тарасов

Акционерное общество «Институт «Гинцветмет»,
доктор технических наук

Нина Петровна Акимова

Акционерное общество «Институт «Гинцветмет»,
кандидат технических наук

Ольга Сергеевна Ежова

Федеральное государственное автономное учреждение
«Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»

Анна Сергеевна Курчакова

Федеральное государственное автономное учреждение
«Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»

ВВЕДЕНИЕ

Никель — самый «молодой» из тяжелых цветных металлов. Его начали применять только в конце XIX в. Он был открыт в 1751 г. и впервые выделен в чистом виде в 1804 г. Никель получают из никелевых руд и минералов. На сегодняшний день никелевая промышленность занимает важное место среди подотраслей цветной металлургии.

Чистый никель — металл светло-серебристого цвета, поверхность которого характеризуется очень высокой отражательной способностью. Он обладает достаточными прочностью и пластичностью, высоким электрическим сопротивлением и низкой теплопроводностью, хорошо обрабатывается как в горячем, так и в холодном состоянии¹.

Другие полезные свойства никеля:

- сопротивляемость к высокой температуре;
- сопротивляемость к окислению;
- твердость и отличная вязкость;
- сопротивляемость к коррозии;
- возможность использования как ферромагнетика (вещества, которое при температуре ниже точки Кюри способно обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля);
- прекрасно поддается полировке;
- механическая прочность;
- возможность длительного пребывания в растворах (кислотных и с высокой концентрацией щелочи);
- способность сохранять магнитные свойства при очень низких (минусовых) показателях температуры.

Основные методы получения никеля — пирометаллургия, гидрометаллургия и электролиз. Никельсодержащими продуктами никелевых заводов являются:

- рафинированный никель, содержащий $\geq 99\%$ Ni, — электролитный никель, пеллерты, брикеты, гранулы, рондели, порошки и пластины, опрессованные из спеченных порошков;
- полуфабрикаты с содержанием $< 99\%$ Ni — ферроникель, спеченный оксид никеля, фэйнштейн, вторичный никель;
- химические соединения никеля — оксиды, сульфат, хлориды, карбонат, ацетат, гидроксид, карбонил и др.

¹ Тарасов А. В. Производство цветных металлов и сплавов : справочник в 3 т. — Т. 2 : Производство тяжелых цветных металлов. — М., 2001.

Чистый никель используют в качестве защитных и декоративных покрытий на железе, алюминии, магнии и ряде других металлов. Для никелирования применяют аноды и растворы, содержащие сульфат никеля. Большое количество никеля расходуется на изготовление щелочных, железоникелевых и никелькадмиевых аккумуляторов, отличающихся высокой емкостью, стойкостью и длительным сроком службы. Никель также используется для изготовления аппаратов химической технологии и посуды с высокой коррозионной стойкостью, приборов радиоэлектроники, в качестве катализатора в химических производствах².

Никелевое сырье

Никель относится к полезным ископаемым первой группы, запасы которых достаточны для удовлетворения потребностей экономики на длительное время при любых сценариях ее развития и не требуют проведения активных геолого-разведочных работ, направленных на их воспроизводство.

Степень освоенности сырьевой базы высокая — недропользователям передано более 90% запасов, при этом в разработку вовлечено почти две трети. В России функционируют предприятия, на которых реализовано производство полного цикла производства никеля — от переработки сырья до выпуска чистого металла. Их деятельность полностью обеспечивается за счет собственного сырья, на экспорт направляется незначительный объем с объектов, не интегрированных в структуру полного цикла. Рафинированный никель высокого качества с содержанием металла 99,97% является основным товарным продуктом, поставляемым на мировой рынок, внутренний спрос низкий и обеспечивается в основном за счет собственного производства.

Мировые запасы никеля заключены в недрах 29 стран и оцениваются в 98,6 млн т, а количество ресурсов металла, выявленных на территории 45 стран, достигает почти 252 млн т. Мировое производство никеля в товарных рудах и концентратах в 2020 г. составило около 2,43 млн т (табл. 1). Минеральное сырье перерабатывается в первичный никель, представленный двумя типами: высокосортный (катоде, брикеты, карбонильный никель, химические соединения), получаемый из сульфидных и латеритных руд, и низкосортный (ферроникель и оксид никеля), производимый только из латеритных руд. Выпуск первичного никеля в 2020 г. составил 2,49 млн т³.

Российская сырьевая база никеля по своим масштабам и качеству руд в разрабатываемых месторождениях позволяет занимать стране ведущее положение на мировом рынке никеля, обеспечивая десятую часть мирового производства никеля в рудах и концентратах. Основу российской сырьевой базы никеля составляют комплексные месторождения сульфидного медно-никелевого типа, они же обеспечивают всю добычу в стране.

² Тарасов А. В. Производство цветных металлов и сплавов. — Т. 2.

³ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [официальный сайт]. — URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения: 13.01.2022).

Таблица 1. Запасы никеля и объемы его производства в рудах и концентратах в мире в 2020 г.

Страна	Запасы, категория	Запасы, млн т	Доля в мировых запасах, %	Производство, тыс. т	Доля в мировом производстве, %
Индонезия	Reserves	21,0	21,3	760	31,3
Филиппины	Reserves	4,8	4,9	320	13,2
Россия	Reserves	6,9	7,0	234,1	9,6
Новая Каледония	Proved + Probable	4,7	4,8	200	8,2
Австралия	Reserves	20,0	20,3	170	7,0
Канада	Reserves	2,8	2,8	150	6,2
Прочие	Reserves	38,4	38,9	595	24,5
Мир	Reserves	98,6	100,0	2429,1	100,0

Источник: Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.

Балансовые запасы никеля заключены в недрах 46 месторождений, еще 15 содержат только забалансовые запасы. Месторождения подразделяются на собственно никелевые (52 объекта) и никельсодержащие (9 объектов).

Месторождения медно-никелевых руд разведаны на территории пяти субъектов Российской Федерации (рис. 1), среди них шесть объектов, в каждом из которых учтено более 1 млн т запасов никеля.



Рис. 1. Основные месторождения никеля на территории Российской Федерации

Основу никелевой сырьевой базы страны составляют месторождения Красноярского края, в меньшей степени — Мурманской области, где расположены крупнейшие горнорудные районы — Норильский и Печенгский (табл. 2).

Таблица 2. Основные месторождения никеля в 2020 г.

Месторождение (субъект РФ)	Геолого- промышленный тип	Доля в запасах РФ, категорий А+В+С ₁ , %	Содержание Ni в рудах, %	Добыча, тыс. т
<i>Разрабатываемые</i>				
ПАО «ГМК «Норильский никель» (Заполярный филиал)				
Октябрьское (Красноярский край)	Сульфидный медно-никелевый	32,8	0,77	168,4
Талнахское (Красноярский край)		22,7	0,67	93,1
АО «Кольская ГМК» (ПАО «ГМК «Норильский никель»)				
Ждановское (Мурманская область)	Сульфидный медно-никелевый	6,85	0,67	32,5
ООО «Медвежий ручей» (ПАО «ГМК «Норильский никель»); ООО «Таймырская ГМК» (ГК «Русская платина»)				
Норильск I (Красноярский край)	Сульфидный медно-никелевый	6,98	0,32	5,4
ПАО «Комбинат Южуралникель», ООО «Техномет»				
Бурукталское (Оренбургская область)	Силикатный никелевый	6,57	0,62	0
<i>Подготавливаемые к эксплуатации</i>				
ООО «Масловское» (ПАО «ГМК «Норильский никель»)				
Масловское (Красноярский край)	Сульфидный медно-никелевый	2,9	0,35	–
ООО «Кингашская ГРК» (Группа «ОНЭКСИМ»)				
Верхнекингашское (Красноярский край)	Сульфидный медно-никелевый	4,2	0,47	–
Кингашское (Красноярский край)		3,5	0,41	–
ООО «Медногорский медно-серный комбинат» (ОАО «УГМК»)				
Еланское (Воронежская область)	Сульфидный медно-никелевый	1,1	1,16	–
<i>Нераспределенный фонд недр</i>				
Серовское (Свердловская область)	Силикатный никелевый	1,4	0,7	–
	Бобово-конгломератовый	1,8	0,16	–

Источники: Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.

Основные предприятия отрасли

В 2020 г. добыча никеля из недр составила 307,1 тыс. т. На обогатительных фабриках произведено 234,1 тыс. т никеля в концентратах. Выпуск первичного никеля (с учетом руд, направляемых на плавку без обогащения) составил 172,4 тыс. т (рис. 2). Еще 6,3 тыс. т было добыто из техногенных месторождений⁴.



Рис. 2. Производство никеля, тыс. т

Источник: Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.

Основным центром добычи никеля является Норильский рудный район на севере Красноярского края, где месторождения Октябрьское, Талнахское и Норильск-1 в 2020 г. обеспечили 86,9% российского показателя. Вторым по значимости регионом остается Мурманская область — на месторождениях Печенгской группы было добыто 11,6% никеля. В Камчатском крае добыча составила 1,5%. Кроме того, на территории Красноярского края разрабатываются техногенные объекты⁵.

Крупнейшей компанией в стране, ведущей добычу никеля (98,5% в 2020 г.) и производящей никелевую продукцию, является вертикально интегрированный холдинг ПАО «ГМК «Норильский никель» («Норникель») (рис. 3); его подразделениям передана в освоение и основная часть запасов металла.

⁴ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.

⁵ Там же.

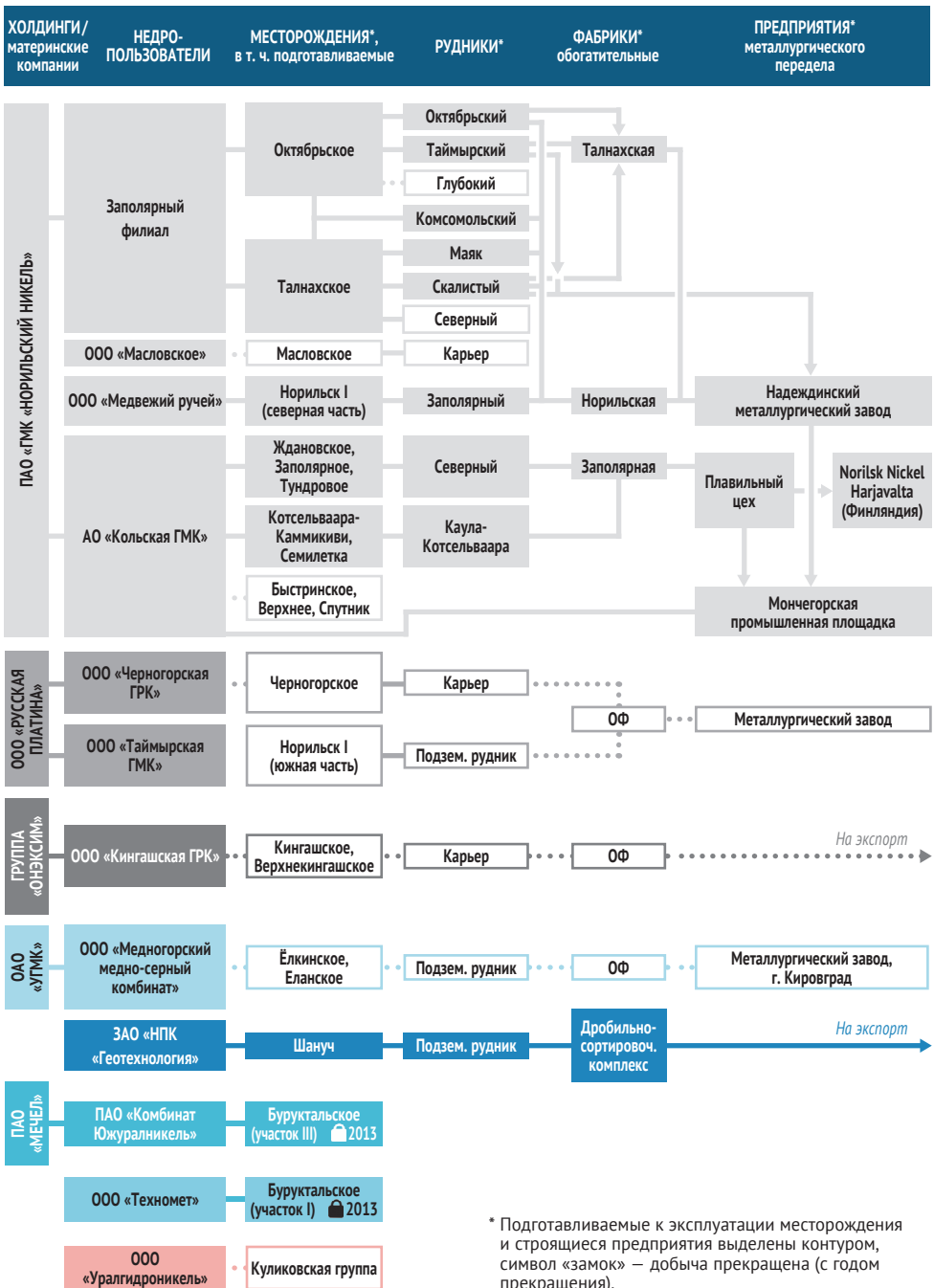


Рис. 3. Структура никелевой промышленности России

Источники: Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации; открытые данные компаний.

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ОТРАСЛИ

Известно, что минералы никеля использовались в Китае еще в III–II вв. до н. э. для получения сплава никеля с медью и цинком при изготовлении монет. В Европе аналогичный минерал был обнаружен только в 1694 г. Из-за неудачных попыток извлечь никель из этого минерала его назвали купферникель — дьявольская медь⁶. Центры производства никеля неоднократно перемещались из одних точек земного шара в другие, что объяснялось наличием месторождений и общей экономической конъюнктурой.

Промышленная выплавка из руд началась с 1825–1826 гг. в Фалуне (Швеция), где был найден никель, содержащий серный колчедан. В 90-х гг. XIX в. шведские месторождения оказались, по-видимому, практически исчерпанными. Лишь во время Первой мировой войны, в 1914–1918 гг., в связи с повышением спроса на металлический никель Швеция давала несколько десятков тонн этого металла (максимум — 49 т в 1917 г.).

Главной областью применения никеля является производство специальных сортов стали. В 1914–1918 гг. для этой цели расходовалось не менее 75 % всего никеля.

В Норвегии производство никеля началось в 1847–1850 гг. Основной рудой здесь являлись пирротипы с содержанием в среднем 0,9–1,5 % Ni. Производство никеля в Норвегии в небольших размерах существует и по настоящее время (максимум — около 700 т в год — производился во время войны 1914–1918 гг.).

В середине XIX в. центр никелевой промышленности сосредоточился в Германии и Австро-Венгрии. Сначала она базировалась здесь исключительно на мышьяковистых рудах Шварцвальда и Гладбаха, а с 1901 г. (и особенно в 1914–1918 гг.) — на окисленных рудах Силезии (Франкенштейн)⁷.

Разработка месторождений никелевых руд в Новой Каледонии началось в 1877 г. Благодаря использованию этих руд мировое производство никеля в 1882 г. достигло почти 1000 т. Добытая здесь руда перерабатывалась на месте лишь в ограниченных количествах, основная ее масса отправлялась в Европу. Затем вследствие высоких транспортных расходов в Европу стали импортировать в основном богатые штейны, содержащие 75–78 % Ni, в количестве около 5000 т в год. В дальнейшем было предложено получать металлический никель в Новой Каледонии, для чего обществом «Никель» был сооружен рафинировочный завод.

Никелевая промышленность в Канаде возникла в конце 80-х гг. XIX в. Здесь работали две фирмы: английская Mond Nickel Co. и американская International Nickel Co., объединившиеся в 1928 г. в мощный мировой трест под названием International Nickel Company of Canada, который поставлял на рынок около 90 % производимого тогда в мире никеля и эксплуатировал месторождения, расположенные вблизи г. Седбюри. Фирма Mond Nickel Co. проплавляла свои

⁶ Тарасов А. В. Производство цветных металлов и сплавов. — Т. 2.

⁷ Техническая энциклопедия : справочник физических, химических и технологических величин / глав. ред. Л. К. Мартенс. — Т. 14 : Мышьяка соединения — Оливин. — М., 1931.

руды на заводе в Конистоне на штейн, который отправлялся для дальнейшей переработки в Англию на завод в Клейдаке. Фирма International Nickel Co. выплавленный на заводе в Копперклифе штейн отправляла для получения металла на завод в Порт-Кольборне⁸.

Зарождение никелевой промышленности в России

Первое месторождение никелевых руд на территории страны было открыто на Урале в 1855 г. Уральские месторождения никелевых руд, содержащие около 2% никеля, рассматривались как один из главных источников сырья для мировой никелевой промышленности. После открытия никелевых руд на Урале М. А. Даниловым, П. А. Демидовым и Г. М. Пермикиным был произведен целый ряд опытов по их переработке. В Ревдинске за 1873–1877 гг. было получено 57,3 т металлического никеля.

К крупному производству никеля снова вернулись под влиянием обстоятельств, вызванных войной 1914–1918 гг. Летом 1915 г. на Уфалейском заводе П. М. Бутыриным и В. Е. Васильевым были произведены опыты выплавки штейна в пламенной печи. В это же время в Петербургском политехническом институте велись опыты по извлечению никеля из уфалейских руд Г. А. Кащенко под руководством профессора А. А. Байкова, а осенью 1915 г. проводились пробные плавки в пламенной печи на заводе. Летом 1916 г. на Ревдинском заводе были проведены опыты выплавки медно-никелевых штейнов из бедных никелевых руд (0,86% Ni) и бедных медью колчеданов (1,5% Cu). Плавка велась в шахтной печи. Тогда же в доменной печи проплавливались ревдинские никельсодержащие бурые железняки на никелистый чугуны (весь никель при этом концентрируется в чугуне). Все перечисленные исследования вследствие целого ряда обстоятельств не получили в то время завершения в форме заводских процессов⁹.

Первый никелевый завод начал работать в 1934 г. на Урале. В 1939 г. практически одновременно был получен первый огневой никель на Норильском малом металлургическом заводе и комбинате «Североникель» на Кольском полуострове. В 1940 г. эти два предприятия давали уже сотни тонн огневого никеля каждое.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Развитие никелевой промышленности происходило благодаря постоянно растущему спросу на никель, обусловленному технологическим прогрессом и развитием промышленности. По этой причине технологические циклы становления никелевой промышленности можно соотнести с основными циклами развития мировой промышленности (табл. 3, рис. 4).

⁸ Техническая энциклопедия. — Т. 14.

⁹ Там же.

Таблица 3. Основные циклы развития никелевой промышленности

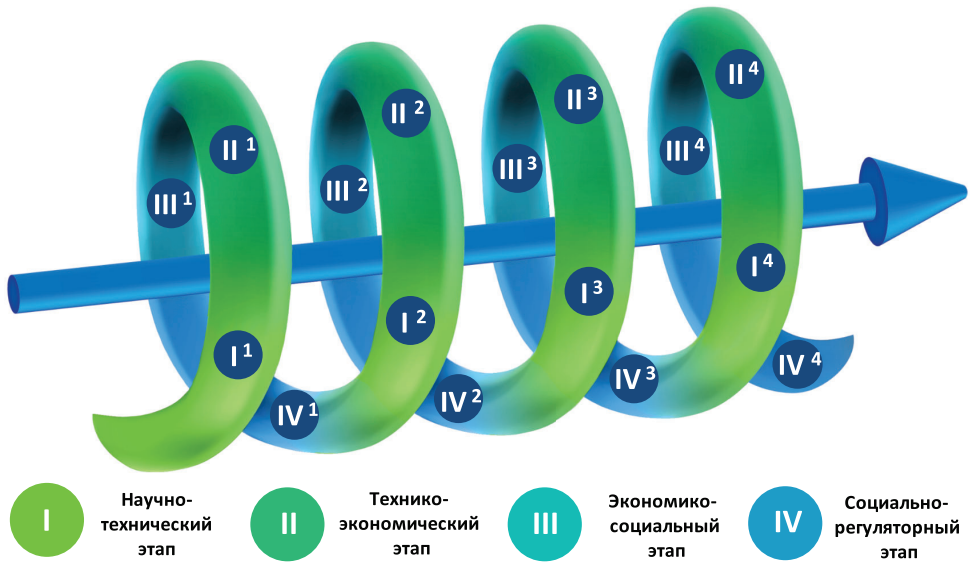
Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (до 1900 г.)	Получение никеля шахтной плавкой	Освоение технологий шахтной плавки	Широкое применение никеля	Высокая трудоемкость производства никеля, высокая цена
Второй (1900–1930 гг.)	Получение никеля электроплавкой	Применение дешевых и достаточно мощных источников электроэнергии	Рост потребления никеля в различных отраслях промышленности	Разработка новых плавильных печей способов рафинирования никеля
Третий (1930–2000 гг.)	Получение никеля гидро- и электротехнологиями	Толчок для развития новых отраслей промышленности	Ужесточения природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий	Применение энергоресурсосберегающих технологий
Четвертый (с 2000 г.)	Получение никеля автогенными способами	Расширение сырьевых нетрадиционных источников и номенклатуры никелевых изделий	Расширение области применения никеля в социально значимых отраслях экономики	Переход на безотходное углеродно-нейтральное производство

Первый цикл — получение никеля шахтной плавкой. Как уже отмечалось, никель был открыт в 1751 г., однако в течение 50–70 лет его промышленное производство и потребление не получали развития. Только в 1825–1826 гг. в Швеции было организовано первое промышленное получение никеля в значительных количествах. Развитие никелевой промышленности длительное время тормозило то, что отсутствовали рациональные методы переработки известных в то время никелевых руд (мышьяковистые и сульфидные никелевые руды в Швеции и Германии).

Тогда никель нужен был только для получения медноникелевого сплава, необходимого для чеканки разменной монеты. Такие сплавы изготавливали в Индии, Китае и Средней Азии очень давно, хотя о существовании никеля еще не было известно.

Рост производства никеля начался только в конце XIX в., когда стали известны многие физические и технические свойства этого металла и были открыты богатые залежи никеля в Новой Каледонии и в Канаде.

Шахтная плавка является наиболее старым способом получения никеля, существовавшим несколько столетий и сохранившим свое практическое значение до настоящего времени.



- I** — Научно-технический этап
- II** — Техно-экономический этап
- III** — Экономико-социальный этап
- IV** — Социально-регуляторный этап
- I¹** — получение никеля шахтной плавкой
- II¹** — получение никеля электроплавкой
- III¹** — получение никеля гидро- и электро-технологиями
- IV¹** — получение никеля автогенными способами
- I²** — освоение технологий шахтной плавки
- II²** — применение дешевых и достаточно мощных источников электроэнергии
- III²** — толчок для развития новых отраслей промышленности
- IV²** — расширение сырьевых нетрадиционных источников и номенклатуры никелевых изделий
- I³** — широкое применение никеля
- II³** — рост потребления никеля в различных отраслях промышленности
- III³** — ужесточения природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных технологий
- IV³** — расширение области применения никеля в социально значимых отраслях экономики
- I⁴** — высокая трудоемкость производства никеля, высокая цена
- II⁴** — разработка новых плавильных печей способов рафинирования никеля
- III⁴** — применение энергоресурсосберегающих технологий
- IV⁴** — переход на безотходное углеродно-нейтральное производство

Рис. 4. Эволюция технологий производства никеля

Шахтная печь представляет собой плавильный аппарат с вертикальным рабочим пространством, похожим на шахту. В поперечном сечении шахтные печи цветной металлургии имеют прямоугольную форму. Шихту, состоящую из руды и флюсов, и топливо периодически загружают на колошниковой площадке отдельными порциями, называемыми колошами. В нижней части печи через фурмы вдувают воздух. В области фурм топливо (кокс или сульфиды перерабатываемой шихты) сгорает, и там развиваются самые высокие температуры (до 1300–1600° С). Зона высоких температур называется фокусом печи. За счет выделяющейся теплоты в фокусе печи происходит плавление шихты и завершается образование продуктов плавки¹⁰.

¹⁰ Лисиенко В. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. — М., 2003.

Жидкие продукты плавки (шлак и штейн) стекают во внутренний горн, откуда они совместно выпускаются по сифонному желобу в передний горн на отстаивание. Раздельный выпуск штейна и шлака осуществляется из переднего горна.

По мере плавления шихта опускается вниз, а на ее место загружают новые порции. Газы, образовавшиеся в области фурм и выше, поднимаются вверх, пронизывают столб опускающейся шихты и отдают ей свою теплоту. Теплообмен между газами и шихтой по принципу противотока обеспечивает самый высокий коэффициент использования теплоты, наблюдающийся в металлургических печах и достигающий в шахтных печах 80–85 %.

По сравнению с большинством других плавильных печей в шахтных печах можно плавить только кусковой материал крупностью 20–100 мм. В случае переработки мелкой шихты (руды или концентратов) ее необходимо подвергать предварительному окускованию методами агломерации или брикетирования.

Второй цикл — получение никеля электроплавкой. В начале XX в. Роберт Монд открыл новый процесс электролиза хлорида цинка и основал компанию Nickel Mond Company (Садбери, Онтарио, Канада) после чего его стали называть «никелевым королем».

Электрохимическая обработка также развивалась во времена «прекрасной эпохи» — в конце XIX — начале XX в. Химики и металлурги Беккерель, Розелер, Адамс и Пфаннхаузер разрабатывают никелирование на основе двойного никеля и сульфата аммония и получают первые детали с никелевым покрытием, которые сейчас распространены в обычных устройствах. Никелирование становится модным процессом гальваники.

Металлурги, стремящиеся улучшить механические и физико-химические свойства изделий из черных металлов, обнаруживают, что, помимо легкости легирования многих металлов никель придает стали и железу большую стойкость. Сталь с 3% никеля по массе используется в колесах железнодорожных вагонов, поскольку минимальная добавка никеля увеличивает нагрузку со 125 кг/м² до 160 кг/м². Военно-морские силы используют никелевые стали для брони кораблей¹¹.

Промышленное освоение электроплавки позволило получать рафинированный никель. Электролитическое рафинирование никеля возможно как в сульфатном, так и в хлоридном электролите. Раньше при работе на низких плотностях тока сульфатный электролит удовлетворял условиям процесса и применялся на всех электролитных заводах. В состав этого электролита, помимо сульфата никеля, входили сульфат натрия, хлорид натрия и борная кислота. Сульфат натрия применяли для понижения сопротивления раствора, поскольку удельная электропроводность чистого NiSO₄ относительно низка. Хлорид натрия добавляли для устранения пассивации анодов. Борная кислота H₃BO₃ способствует получению качественных катодных осадков никеля с гладкой матовой поверхностью, серебристо-белого цвета.

¹¹ *Lederman D. Natural Resources, Neither Curse nor Destiny. — Maloney, 2006.*

В связи с последующей интенсификацией электролиза, повышением плотности тока удельная электропроводность названного сульфатного раствора оказалась недостаточной. Для ее увеличения в электролит стали вводить все в больших количествах NaCl. Помимо повышения удельной электропроводности увеличение содержания иона хлора способствует росту катодного и анодного выходов по току и позволяет иметь меньшие содержания в электролите борной кислоты.

Третий цикл — получение никеля гидро- и электротехнологиями. Помимо электролитического рафинирования никеля с металлическими или сульфидными анодами в небольших масштабах стали применять гидроэлектрометаллургический способ получения никеля, включающий выщелачивание никельсодержащего продукта и электроэкстракцию с нерастворимыми анодами.

Промышленное развитие гидроэлектрометаллургии получила в конце позапрошлого столетия после появления мощных источников питания. С 80-х гг. XX в. начали появляться производства с крупными электролизными цехами для получения металла.

Развитие отечественной гидроэлектрометаллургии связано с именами И. М. Аваева, П. П. Федотьева, Ю. В. Байкова, О. А. Есенина и многих других.

К гидрометаллургическим процессам относят выщелачивание, экстракцию, сорбцию, электролиз водных растворов. Выщелачивание — перевод металла или его соединения из сырья в водный раствор. Различают простое выщелачивание (растворение) или выщелачивание с химической реакцией, при котором происходит изменение химического состояния исходного вещества. При температуре выше 100° С для выщелачивания используют автоклавы — герметичные аппараты, работающие при повышенных температурах и давлениях. Например, автоклавное выщелачивание применяют при переработке урановых, алюминиевых, вольфрамовых руд и концентратов.

В результате выщелачивания образуется пульпа, продукты фильтрации которой — раствор и кек (твердый остаток). Экстракция, сорбция, электролиз — эти процессы используются для извлечения металлов из водных растворов, разделения компонентов растворов, концентрирования, очистки от примесей. Экстракция — перевод вещества из водного раствора в органическую фазу, не смешивающуюся с водной фазой (раствором). Сорбция — процесс извлечения веществ из раствора при помощи твердых ионообменных смол — ионитов. Электролиз — процесс осаждения металла из водного раствора на катоде под действием электрического тока ¹².

Четвертый цикл — получение никеля автогенными способами. Идея использования автогенного процесса для плавки флотационных концентратов на штейн возникла и впервые была опробована в Советском Союзе, получив в дальнейшем широкое распространение во всем мире. В настоящее время можно назвать не менее двух десятков освоенных промышленностью, внедряемых и разрабатываемых автогенных процессов.

¹² Снурников А. П. Гидрометаллургия цинка. — М., 1981.

Автогенными называются технологические процессы, которые осуществляются полностью за счет внутренних энергетических ресурсов без затрат посторонних источников тепловой энергии — топлива или электрического тока. При переработке сульфидного сырья, обладающего достаточно высокой теплотворной способностью, автогенность пирометаллургического процесса (плавки) достигается за счет тепла экзотермических реакций горения (окисления) сульфидов перерабатываемой шихты. В качестве окислительного реагента при плавке можно использовать воздух, обогащенное кислородом дутье или технологический кислород.

Все автогенные плавки являются совмещенными. Они объединяют в одном металлургическом аппарате процессы обжига, плавки и — частично или полностью — конвертирование.

Автогенные процессы позволяют создавать технологические схемы, обеспечивающие минимальные энергетические затраты и высокую комплектность использования сырья, а также предотвращают загрязнения окружающей среды¹³.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Жизненный цикл никеля

Любая произведенная продукция имеет свой период существования, который характеризуется ее производством, потреблением, утилизацией или переходом в качестве исходного сырья или вспомогательного вещества в производство другой продукции. Никель, как и любой другой металл или минерал, имеет жизненный цикл и проходит множество технологических процессов, прежде чем принять пригодную для использования форму (рис. 5). Рассмотрим жизненный цикл никеля с акцентом на необходимых этапах и условия для обеспечения вечного жизненного цикла никеля.

Никель можно бесконечно перерабатывать и заново пускать в оборот без потери качества. Как правило, металлы, произведенные из первичного сырья, нельзя отличить от металлов из вторичного сырья. Поэтому особый акцент делается на обеспечении максимально возможного сбора и утилизации никеля в конце срока службы содержащих его изделий.

Относясь к продукции со степенью вторичной переработки в 68 %, никель находится среди металлов с самым высоким коэффициентом возвращения в оборот. Это означает, что более двух третей никеля, находящегося в потребительских товарах, перерабатывается и пускается в повторный оборот, когда срок службы этой продукции подходит к концу¹⁴.

Вторичная переработка является ключевым фактором устойчивого материала. Это уменьшает потребность в добыче новых ресурсов и требует меньше энергии, чем горная промышленность.

¹³ Уткин Н. И. Металлургия цветных металлов. — М., 1985.

¹⁴ Вторичная переработка и утилизация никеля — на пути к экономике замкнутого цикла // Никель. — 2018. — Т. 33, № 2. — С. 12.



Рис. 5. Жизненный цикл никеля

Никель и его сплавы, включая коррозионностойкие и жаропрочные стали, практически на 100 % подлежат вторичной переработке и могут быть переработаны бесконечно без потери качества, так как никель не разрушается. Никель сохраняет большую часть своей первичной металлической ценности: ломы премиум-класса обычно содержат не менее 95 % стоимости первичного металла из недавно добытой руды. Значения лома для конкурирующих материалов колеблются от примерно 60 до 0 %. Для переработки никеля требуется только около 20 % энергии, необходимой для извлечения и обработки первичного металла.

Утилизированный никель начинает новый срок службы в большинстве случаев в качестве нержавеющей стали, а около 15 % его попадает в систему вторичной переработки углеродистой стали. Но все же анализ данных говорит о том, что 17 % никеля пока в повторный оборот не возвращается.

Добыча никеля

В настоящее время добыча никелевого сырья осуществляется подземным (шахтным) или открытым (на карьерах) способом в зависимости от глубины залегания породы (в отдельных случаях возможна комбинированная разработка месторождений)¹⁵.

¹⁵ Добыча и обогащение руд цветных металлов : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 23-2017 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/556173697> (дата обращения: 13.01.2022).

Добыча открытым способом

Открытая разработка месторождения включает в себя: подготовку поверхности, осушение месторождения, горно-капитальные работы по вскрытию и подготовке к добыче, в том числе вскрытие путем удаления вмещающих руду пустых пород, и добычные работы (типовая схема приведена в статье по производству алюминия, с. 45 наст. изд.).

Основные процессы открытых горных работ: подготовительные работы (снятие почвы, вскрытие рудного тела), буровзрывные работы, добыча руды, транспортировка, обращение с породами (первичная подготовка, складирование пород и некондиционного сырья). Подробно процессы рассмотрены в статье по производству алюминия (с. 45–49 наст. изд.).

Добыча подземным способом

Подземная разработка месторождений медных руд различных форм, мощности, углов падения, на разных глубинах осуществляется с использованием подземных горных выработок (типовая схема приведена в статье по производству алюминия, с. 50 наст. изд.). Она включает в себя вскрытие, подготовку и очистную выемку, которые выполняются последовательно или совмещенно во времени и пространстве с целью обеспечения производства достаточными запасами вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов полезного ископаемого.

Основные горные выработки:

- шахтные стволы, квершлаг и штольни, открывающие доступ ко всему месторождению или его части и обеспечивающие возможность проведения подготовительных выработок и очистной выемки в запланированных объемах;
- штреки, квершлаг, уклоны, бремсберги, восстающие, орты, которыми вскрытая часть месторождения разделяется на обособленные выемочные участки, предусмотренные принятым способом подготовки и системой разработки;
- поэтажные и слоевые выработки, выработки буровые, погрузочно-доставочные, подсечки, вентиляционные, отрезные восстающие, лавы и другие забойные выработки, обеспечивающие выемку полезных ископаемых.

Этапы подземной разработки месторождения: подготовка рудничного поля, отделение горной массы от массива, выдача на транспортные выработки и транспортирование на поверхность с размещением пород в выработанном пространстве или отвалах.

Обогащение медно-никелевых руд

Наиболее распространенный никелевый минерал — пентландит (железо-никелевый колчедан), который обычно находится в ассоциации с пирротинном и халькопиритом. По флотуруемости пентландит занимает промежуточное положение между пирротинном и халькопиритом. При флотационном разделении халькопирита и пентландита последний подавляют известью, иногда с добавлением цианида или декстрина.

Относительно распространены миллерит и никеленосный пирротин. В состав пирротина никель входит в виде изоморфной примеси. Из них хуже флотируется никеленосный пирротин. Различные образцы пирротина, отличающиеся по составу соотношением серы и железа в минерале (атомное отношение серы к железу в пирротине изменяется от 1,00 до 1,25), обладают неодинаковой флотуемостью. Чем выше содержание в пирротине трехвалентного железа, тем лучше флотируется минерал ксантогенатами.

Все щелочи, как правило, депрессируют никеленосный пирротин. Миллерит (и пентландит) из всех щелочей подавляет только известь. Хороший активатор пирротина — медный купорос.

На обогатительных фабриках применяют три разновидности промышленных схем переработки медно-никелевых руд.

1. Коллективная флотация минералов меди и никеля из исходной руды без последующего разделения коллективного концентрата; продукты флотации в ходе процесса иногда подвергают магнитной сепарации. Из коллективного концентрата выделяют металлы при металлургическом переделе.

2. Коллективная флотация минералов меди и никеля из исходной руды с последующим разделением коллективного концентрата на медный и никелевый. Коллективный концентрат всегда разделяют при подавлении пирротина и пентландита (флотация минералов меди).

Промышленные способы разделения медно-никелевых концентратов (флотация минералов меди при подавлении пентландита и никеленосного пирротина) — реагенты-подаватели: известь, известь и реагент 633, известь и цианид, известь и декстрин.

Никель, попавший в медный концентрат, теряется при металлургическом переделе; медь, перешедшая в никелевый концентрат, извлекается затем практически полностью.

При селективной флотации возможно подавление пентландита и пирротина линосульфратом в высокощелочной среде.

3. Магнитная сепарация исходной руды с последующей флотацией никеленосного пирротина из магнитной фракции (никелевый концентрат) и коллективная медно-никелевая флотация немагнитной фракции; коллективный концентрат разделяют.

Магнитное обогащение применимо для никелевых руд, содержащих пирротин. Магнитная восприимчивость пирротина колеблется в широких пределах. Пирротин сульфидных медно-никелевых руд обычно представлен смесью сильномагнитных моноклинных пирротинов и слабомагнитных гексагональных.

Крупность измельчения руд перед коллективной флотацией — 50–80 % — 74 мкм. В коллективном цикле pH 7,8–9,5; возможна флотация в естественной или кислой среде. Регулятор среды — кальцинированная сода и 25 %-ный раствор аммиака (0,8–1 кг/т, дозировка в измельчение). При использовании аммиака снижается загрязнение оборотной воды.

В качестве собирателей эффективны амиловый (средний расход 85 г/т), бутиловый (100–150 г/т), изопропиловый (80 г/т) ксантогенаты, сочетание триэтиокарбоната щелочного металла и натрийбутилмеркаптида (от 10:1 до 1:1).

Для активации пентландита и никеленосного пирротина используется медный купорос.

Из пенообразователей в промышленных условиях эффективны реагенты типа соснового масла (сосновое масло, флотол), ксиленол, бутиловый аэрофлот, Доуфрос, Т66, метилизобутилкарбинол, ТЭБ. В качестве регулятора пенообразования (и одновременно как дополнительные собиратели) эффективны длинноцепочечные дитиофосфаты и меркаптобензотиазол.

Для подавления флотоактивной силикатной породы применяются карбокси-метилцеллюлоза, карбосульфит и карботиосульфат, тринатрийфосфат, декстрин, крахмал, жидкое стекло, комбинации пирофосфат — гуартек. При обогащении вкрапленных медно-никелевых руд с высоким содержанием флотоактивной пустой породы рекомендуется ее предварительная флотация с дозировкой одного пенообразователя, с последующим доизвлечением ценных минералов из пенного продукта при депрессии минералов породы органическими подавителями.

Для повышения показателей коллективной флотации целесообразно введение операции интенсивного кондиционирования пульпы с реагентами (10–15 мин).

Оптимальный режим разделения коллективного медно-никелевого концентрата включает аэрацию пульпы воздухом в известковой среде с добавлением во флотацию цианида для усиления подавления пентландита и никеленосного пирротина. Высокосортный никелевый концентрат получается в виде хвостов основной медной флотации, низкосортный — в виде хвостов перечисток (в перечистки для уменьшения флотируемости пирротина и пентландита дозируется цианид). При добавлении цианида несколько снижается флотоактивность халькопирита; после дозировки цианида рекомендуется аэрация пульпы для восстановления флотационных свойств халькопирита.

Для повышения селективности флотации рекомендуется подогревать пульпу до 38° С. Для снижения остаточной концентрации кантогената вместо аэрации пульпы возможно применение реагентов-окислителей (перекись водорода, гипохлорит натрия); эффективно добавление в пульпу древесного угля.

Ферроникелевые пирротиновые концентраты рекомендуется перерабатывать с применением комбинированного процесса (гидрометаллургия — флотация): окислительное автоклавное выщелачивание концентрата с использованием в качестве окислителя кислорода; осаждение тяжелых цветных металлов в виде сульфидов; серносульфидная флотация пульпы с применением (дробная подача) дибутилдитиофосфата и керосина, также пенообразователя при pH 4 и содержании твердого в пульпе 30%; селективная дезинтеграция серносульфидного концентрата путем нагрева до температуры выше точки плавления серы. Конечный сульфидный концентрат содержит до 12% никеля (при извлечении около 90%). Из серного концентрата (содержит 70–75% серы) плавкой получают товарную серу¹⁶.

¹⁶ Технологические схемы и режимы обогащения медно-никелевых руд // metallolome.ru : Научно-технический портал о металлургии, горной промышленности, машиностроении, обработке металлов, энергетике. — URL: <https://metallolome.ru/tehnologicheskie-shemy-i-rezhimy-oboga-8/> (дата обращения: 15.12.2022).

Для обогащения медно-никелевых руд на предприятиях «Норникеля» применяют методы коллективной, селективной и коллективно-селективной флотации в зависимости от минералогического и геофизического типа руды. Никельсодержащие сульфидные руды в отличие от окисленных поддаются флотационному обогащению. Так, из руды, содержащей 1–3% Ni, получают концентрат с 7–20% Ni. Технологическая схема включает в себя дробление, измельчение и флотацию. В зависимости от состава руды, в частности от соотношения меди и никеля, используются различные схемы. При небольшом содержании в руде халькопирита реализуется процесс коллективной флотации с получением Ni–Cu-концентрата, при значительном (массовое соотношение $Cu : Ni > 0,3$) — производится разделение на никелевый (медно-никелевый) и медный концентраты. На Талнахской обогатительной фабрике (Заполярный филиал ПАО «ГМК «Норильский никель»), перерабатывающей сплошные сульфидные руды, выделяют никелистый пирротин в отдельный так называемый пирротиновый концентрат. Наиболее распространенной практикой переработки никелевых сульфидных концентратов является штейновая плавка, которая может быть реализована либо в автогенных агрегатах (печь взвешенной плавки), либо в руднотермических электропечах. Полученный штейн конвертируют с получением файнштейна, который затем рафинируют гидрометаллургическим (весь мир) или комбинированным (Россия) способом с получением товарных металлов (рис. 6).

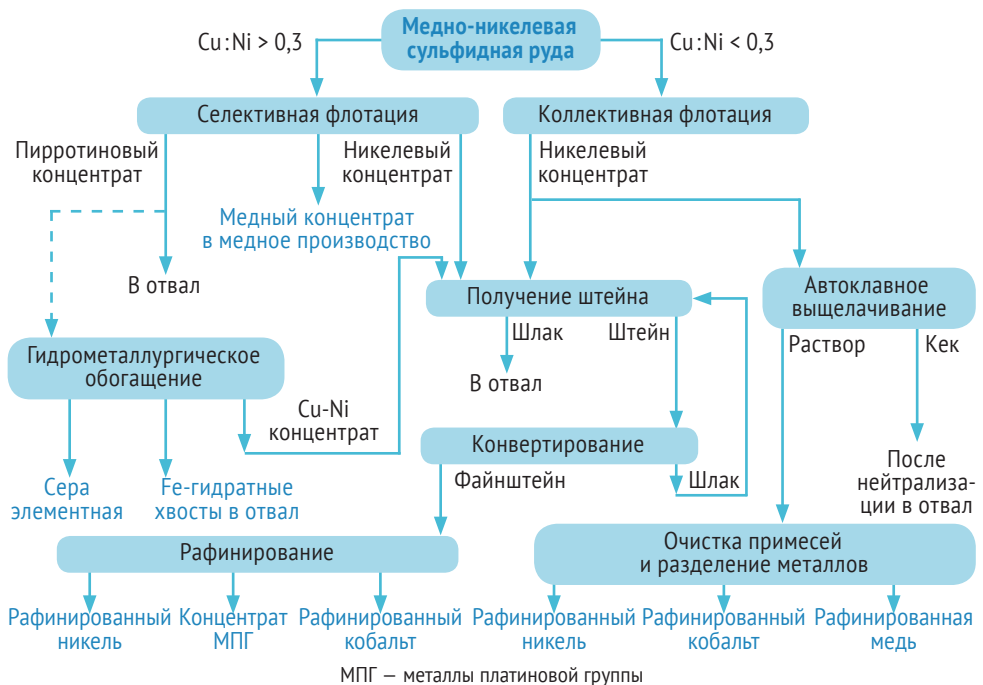


Рис. 6. Принципиальная схема переработки сульфидных медно-никелевых руд

Источник: Производство никеля и кобальта : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 12-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068891> (дата обращения: 27.01.2022).

Содержание никеля в селективных никелевых концентратах достигает 10,5%. Коллективные медно-никелевые концентраты содержат 3–10% меди и 7–15% никеля при среднем извлечении из них 92,5% меди и 82,1% никеля. Извлечение металлов платиновой группы, золота, серебра и кобальта осуществляется попутно, главным образом в цикле коллективной флотации.

Производство никеля

Технологические схемы переработки никелевых руд определяются их типом и особенностями химического состава. Так, если переработка сульфидных руд не отличается разнообразием, головными операциями технологической схемы являются пирометаллургические процессы, обеспечивающие получение медно-никелевого файнштейна, то схемы получения никеля из латеритов весьма разнятся между собой, как по типу и набору технологических операций, так и по виду конечной продукции¹⁷.

Технология гидрометаллургического обогащения бедного никель-пирротинового концентрата

Гидрометаллургическое обогащение никель-пирротинового концентрата является уникальным в своем роде процессом и преследует цель повышения содержания цветных металлов за счет окисления основной части пирротина и отделения невоскрывшихся и вторичных сульфидов цветных металлов от сформировавшегося при автоклавном окислительном выщелачивании железистого гидратного осадка и элементарной серы.

Процесс реализуется в условиях высокотемпературного автоклавного (130–150° С) выщелачивания при использовании кислородо-воздушной смеси (80% O₂) в качестве окислителя и лигносульфоната технического в качестве поверхностно-активного вещества, препятствующего пассивации поверхности сульфидов пленкой элементарной серы. Реализация процесса при температуре выше точки плавления серы обеспечивает не только высокую скорость окисления, но и существенно снижает скорость образования серосульфидных настывлей на поверхности теплообменников.

Химизм процесса окисления пирротина при выщелачивании описывается реакцией, по которой порядка 80% серы пирротина переходит в элементарную форму. Перешедшее в раствор в процессе окисления сульфидов железо далее подвергается окислению и гидролизу с формированием твердой железокислой фазы.

Учитывая последовательно-параллельное протекание реакций окисления сульфидов цветных металлов и пирротина, для обеспечения глубокого окисления последнего необходимо частично вскрыть также пентландит

¹⁷ Производство никеля и кобальта : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 12-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068891> (дата обращения: 27.01.2022).

и халькопирит. В результате этого в раствор переходит порядка 75 % никеля, 50 % меди, 70 % кобальта.

Учитывая конечную цель процесса гидрометаллургического обогащения бедного никель-пирротинового концентрата — получение пригодного для дальнейшей переработки пирометаллургическими методами сульфидного концентрата цветных металлов, из растворов автоклавного выщелачивания производится осаждение частично растворившихся цветных металлов.

В качестве осадителя используются металлизированные железистые окатыши и присутствующая в пульпе элементарная сера. Осажденные на этой операции вторичные сульфиды меди, никеля и кобальта, а также не вскрытые на головном выщелачивании первичные сульфиды цветных металлов вместе с элементарной серой извлекаются в серосульфидный концентрат методом флотации.

Учитывая флотационные свойства компонентов пульпы и задачи процесса, флотацию ведут в кислой среде при использовании в качестве собирателя бутилового ксантогената. Промпродукты флотации являются оборотными и возвращаются на основную флотацию, концентрат направляется на получение элементарной серы и товарного сульфидного концентрата, хвосты после двухстадийной нейтрализации в присутствии воздуха — в отвал.

Процесс получения элементарной серы и товарного сульфидного концентрата из серосульфидного концентрата состоит из нескольких основных технологических операций: дезинтеграции, серной флотации и автоклавной выплавки серы.

Целью дезинтеграции — высокотемпературной обработки серосульфидного концентрата — является разрушение сростков сульфидов цветных металлов и железа с элементарной серой. При этом происходит выделение серы и сульфидов из их мелкодисперсных конгломератов в самостоятельные частицы и агрегации — укрупнение капель выделенной серы до размеров, обеспечивающих оптимальные показатели последующих операций. Введение технической извести в серосодержащую пульпу приводит к развитию процессов образования различных серосодержащих соединений кальция, в том числе сульфида и гидросульфида, подавляющих процесс смачивания сульфидов расплавленной серой.

Полученную пульпу вместе с хвостами серной плавки направляют на серную флотацию, концентрат которой — на автоклавную выплавку серы, а хвосты, являющиеся товарным концентратом ЦМ, — в пирометаллургическое производство. Хвосты плавки передаются на серную флотацию, расплавленная сера — в аппараты-отстойники, где происходит окончательное отделение золы составляющей (сульфидов). Зола вместе с частью серы гранулируется и передается на серную плавку, чистая сера — на склад готовой продукции.

Технологии производства штейна

Технология получения штейна в руднотермической печи РТП

В настоящее время сульфидный медно-никелевый концентрат подвергают брикетированию и направляют на электроплавку без обжига.

Схема переработки пульпы концентрата на стадии приготовления брикетов включает в себя следующие основные этапы:

- первичное обезвоживание пульпы на пресс-фильтрах;
- смешивание концентрата со связующим (жидкий лигносульфонат);
- сушка смеси в сушильном барабане;
- повторное введение в подсушенную шихту лигносульфоната;
- брикетирование шихты на валковом брикет-прессе.

Со склада готовой продукции готовые брикеты железнодорожным или автомобильным транспортом транспортируются на склад привозного сырья участка подготовки сырья и шихты (УПСиШ), где шихтуется с флюсом и восстановителем и транспортером по тракту подачи шихты подаются в расходные бункеры РТП.

Основным сырьем для электроплавки является шихта, состоящая из: сульфидной медно-никелевой руды, брикетов, собственных и привозных оборотных никельсодержащих оборотов, флюса (песка), углеродистого восстановителя.

Физико-химические превращения шихтовых материалов и образование продуктов плавки происходит в основном в ванне печи на поверхности шихты, погруженной в шлак. При нагреве шихты до 1000° С в ней протекают процессы термического разложения сложных сульфидов, сульфатов, карбонатов и гидратов, а также процессы взаимодействия между различными химическими соединениями, наиболее важными из которых являются реакции между сульфидами и окислами. При повышении температуры шихты до 1000–1300° С эти процессы получают активное развитие.

Сульфиды никеля, меди, кобальта, железа расплавляются, частично разлагаются (общая десульфуризация при электроплавке составляет около 20–35%) и, взаимно растворяясь, образуют основной продукт электроплавки — штейн, в котором также растворяются драгоценные металлы и магнетит.

Полученный штейн (% масс.: никель — 7–17, медь — 3–12, кобальт — 0,6–0,8, железо — 38–50, сера — 25–27; извлечение никеля в штейн составляет 97–98%, меди — 95–97%, кобальта — 77–85%) в жидком виде направляется на конвертирование. Окисленное железо и другие основные оксиды, вступая во взаимодействие с SiO₂, образуют силикаты типа $m\text{MeO} \times n\text{SiO}_2$, которые, смешиваясь в расплавленном состоянии, образуют другой продукт электроплавки — шлак.

Технология получения штейна в печи взвешенной плавки

Технологическая схема получения штейна в печи взвешенной плавки включает в себя (рис. 7):

- фильтрацию концентратов на керамических фильтрах;
- сушку концентратов и флюсов в распылительных и барабанных сушилках;
- взвешенную плавку шихты концентратов в двух печах взвешенной плавки;
- пневматическую транспортировку высушенных концентратов;
- охлаждение отходящих газов в котле-утилизаторе с одновременной грубой очисткой от пыли;
- тонкую очистку от пыли в электрофильтрах;
- обеднение шлаков печей взвешенной плавки и конвертеров в электрообеднительных печах;
- грануляцию шлака обеднительных печей и его транспортирование на склад временного хранения.

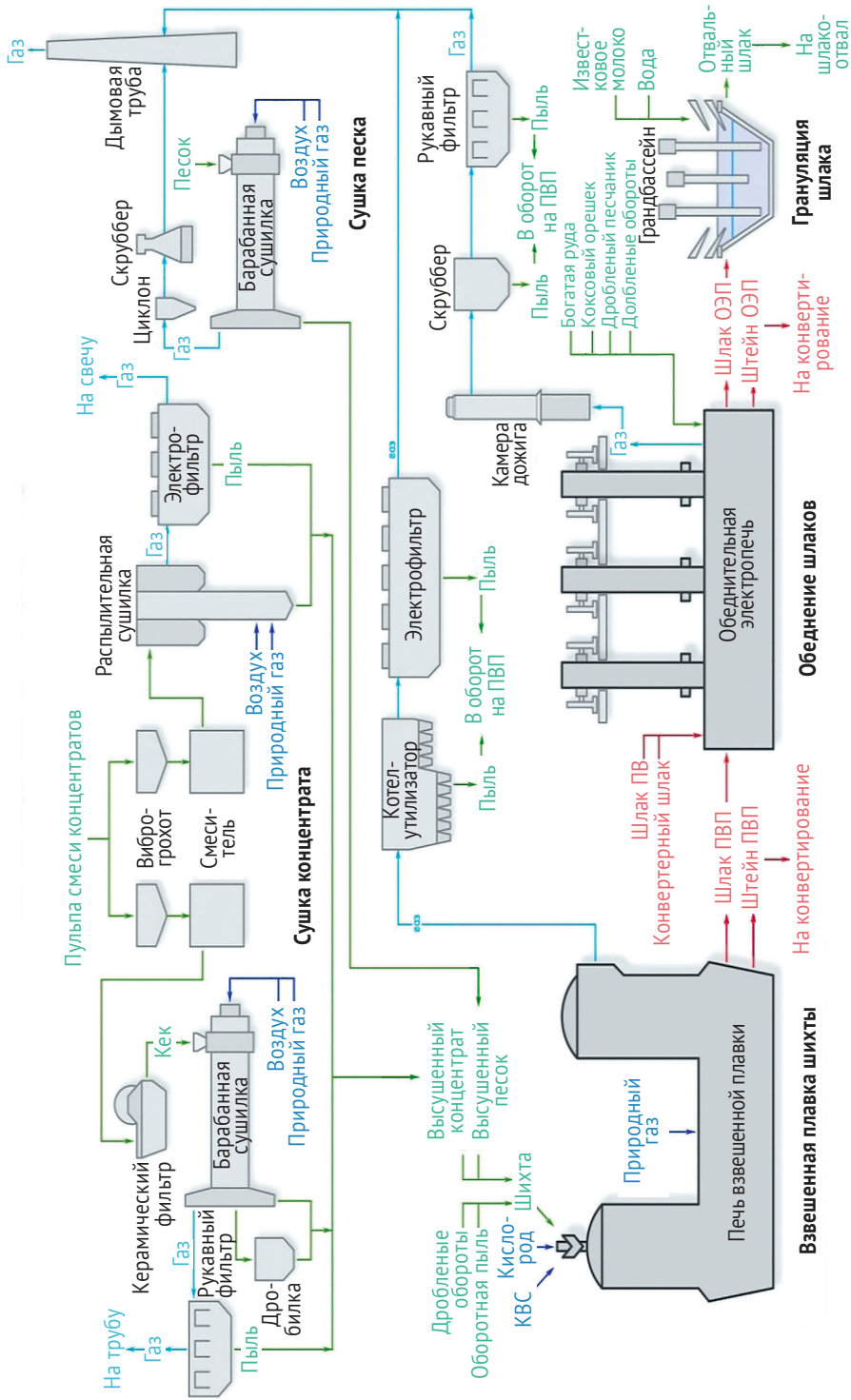


Рис. 7. Аппаратурно-технологическая схема цеха плавки

Источник: Производство никеля и кобальта : ИТС НДТ 12-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов

Печь взвешенной плавки (ПВП) является головным агрегатом в цепи переработки сульфидных концентратов.

Степень обогащения дутья кислородом на печах взвешенной плавки может достигать 70%, что позволяет вести процесс плавки в автогенном режиме, без применения дополнительного топлива. Дутье предварительно не подогревают. Пылевывнос из печей взвешенной плавки составляет не более 5–7% от веса загружаемой шихты.

Медно-никелевый штейн из ПВП (Ni — 31,3–41,6%, Cu — 8,95–15,93%, Co — 0,6–0,85%, Fe — 29,5–31,8%, S — 25,3–28,4%), как и любой штейн, представляет собой сплав сульфидов никеля, меди, железа, кобальта с небольшим содержанием магнетита, которое зависит от содержания цветных металлов. Выпуск штейна осуществляется в ковши через шпурсы, расположенные в отстойной зоне печи; штейн передают на никелевое конвертирование для переработки до фاینштейна.

Шлак ПВП представляет собой многокомпонентный сплав оксидов и в значительной степени обогащен цветными металлами, в связи с чем подается (в расплавленном состоянии) в обеднительные печи (вместе с конвертерными шлаками).

Технологии производства фاینштейна

При конвертировании штейнов в конвертер могут быть загружены штейн, песок, никелевый шлак и другие оборотные холодные материалы.

Основными реакциями, протекающими при конвертировании штейнов, являются реакции окисления, обменного взаимодействия, восстановления и шлакообразования.

При конвертировании штейнов выделяют следующие технологические операции:

- зарядка конвертера;
- период набора массы;
- «варка» фاینштейна;
- разливка и охлаждение фاینштейна.

В период набора массы при конвертировании в шлак интенсивно удаляется железо, в результате чего количество обогащенной массы сокращается. В этот период идет активная загрузка в конвертер кварцевого песка и холодных материалов для поддержания теплового баланса процесса. После прекращения набора штейна начинается период варки фاینштейна. В задачу этого периода входит почти полное удаление железа из обогащенной конвертерной массы. Полученный фاینштейн содержит 22–24% S и до 3,7% железа.

Полученный медно-никелевый фاینштейн перевозится в разливочный пролет цеха и разливается в стальные формы — изложницы, зафутерованные блоками из графита, для медленного охлаждения и раскристаллизации расплава, обеспечивающих хорошие показатели разделения на никелевый и медный концентраты.

Технология разделения медно-никелевого файнштейна с получением никелевого сульфидного концентрата

Технологический процесс разделения файнштейна на никелевый и медный концентраты включает в себя следующие технологические операции: крупное дробление, шихтовку, дробление и измельчение и собственно флотацию.

Разделение файнштейна, предварительно измельченного до крупности 85–95 % — 45 мкм, происходит во флотомашинах основной флотации с получением пенного и камерного продуктов, представляющих собой черновые медный и никелевый концентраты соответственно, которые затем подвергаются дополнительной очистке.

Никелевый очищается от меди за счет добавки свежего ксантогената, который повышает флотуемость медных сульфидов, медный — от никеля на 1–4 перечистных флотациях за счет повышения щелочности пульпы и снижения плотности камерных продуктов от первой до последней перечистки.

Для обеспечения эффективного разделения медных и никелевых сульфидов часть пенных и камерных промпродуктов объединяется и направляется на классификацию, пески которой доизмельчаются. Точки рецикла промпродуктов и объединения потоков пенных и камерных продуктов выбираются исходя из их состава, в первую очередь из содержания в них вторых металлов.

Существующая технологическая схема флотационного разделения файнштейна позволяет достичь извлечения никеля в никелевый концентрат до 92 %, меди в медный — до 91 %.

Получаемый медный концентрат содержит 67–68 % меди и 3,2–4,2 % никеля, никелевый — 68–69 % никеля и 2,3–2,9 % меди.

При разделении медно-никелевого файнштейна в качестве основных технологических материалов используются бутиловый ксантогенат калия, сода каустическая, шары стальные и вода оборотного водоснабжения.

Технология получения частично восстановленного никелевого концентрата

Технология получения частично восстановленного никелевого огарка (ПНТП — порошка никелевого трубчатых печей) включает в себя операции обезвоживания никелевого концентрата флотации файнштейна, его окислительного обжига в печах кипящего слоя и восстановительного обжига в трубчатых вращающихся печах.

Окислительный обжиг, целью которого является максимальное удаление серы и подготовка материала к восстановлению, ведется при температуре 1050–1250° С. Загрузку шихты регулируют по температуре в слое, по концентрации диоксида серы (SO₂) в отходящих газах, по заданному расходу воздуха (или воздуха, обогащенного кислородом).

Основная часть полученного огарка передается на восстановление в трубчатые вращающиеся печи, часть подается в бункер «горячего» огарка для использования его без восстановления при доводке анодного металла по углероду.

Технология производства черновых никелевых анодов

На сегодняшний день основная часть никелевого порошка трубчатых печей поступает на анодную плавку в дуговые электропечи, часть — на хлорное растворение для восполнения дефицита никеля. Шихта печей включает в себя помимо порошка восстановитель и анодный скрап.

При расплавлении шихты свободный углерод и закись никеля растворяются в расплавленном металле, при этом происходит «науглероживание» ванны металла по реакции с образованием карбида никеля (Ni_3C), который при растворении в металле взаимодействует с закисью никеля.

Растворимость углерода в металле высока, и на начальных этапах плавки с учетом положительного влияния науглероживания расплава на температуру плавления металла процесс ведут с избытком восстановителя, который на финальных этапах удаляют присадкой огарка в жидкий металл. Доводка металла по содержанию углерода может также осуществляться кислородной продувкой.

К моменту полного расплавления шихты в печи образуются шлаковая и металлические фазы. В основном шлак состоит из окислов, содержание которых может достигнуть 95 %. Снижение потерь цветных металлов со шлаками и увеличение их извлечения в анодный никель происходит тем полнее, чем лучше восстановительные условия в печи и чем выше активность окислов в шлаке, которая зависит от количества флюсующих добавок, таких как известняк, окись кремния.

После обеднения шлака избыток его порционно сливают путем наклона печи. При этом богатая часть шлака возвращается на плавку, а бедная отправляется на переработку в РТП. Готовый металл разливается по изложницам карусельной машины и направляется на электролитическое рафинирование с получением катодного металла.

Технологии получения катодного никеля

Электролитическое рафинирование черновых никелевых анодов — достаточно старая технология, обеспечивающая получение товарного никеля, в том числе из драгметаллсодержащего сырья.

В настоящее время на предприятиях, выпускающих товарный никель высокой чистоты, переходят от технологии рафинирования черновых никелевых анодов к гидрометаллургической технологии рафинирования восстановленного никелевого порошка (ПНТП).

Эта технология предусматривает получение товарного никеля электроэкстракцией из хлоридных растворов. На первом этапе в качестве исходного сырья предусматривается использование ПНТП. В дальнейшей перспективе

представляется целесообразным использование в качестве обособленного сырья металлизированной фракции от разделения файнштейна и далее никелевого концентрата от разделения файнштейна.

Организационно производство электролитного никеля включает в себя три основных отделения: электролизное, гидрометаллургическое (ГМО) и отделение готовой продукции.

Технология рафинирования черновых анодов

Наряду с металлическим никелем черновые аноды содержат первые проценты основных примесей: железа и меди, кобальта и доли процента серы. Кроме того, в черновых анодах содержится широкий спектр различных микропримесей, включая драгоценные металлы. Рафинирование черновых никелевых анодов осуществляется в электролизных ваннах (электролизерах ящичного типа) с разделением катодного и анодного пространств проточной тканевой диафрагмой. При этом используется сульфат-хлоридный никелевый электролит. Катоды внутри ванн помещены в диафрагменные ячейки, а аноды находятся в общем анодном пространстве. За счет прохождения постоянного тока на анодах происходит растворение никеля и примесей с получением загрязненного никелевого раствора — анолита. На катодах в эквивалентном пропущенному току количестве осаждается чистый катодный никель. В каждую катодную ячейку непрерывно подается очищенный от примесей никелевый раствор — католит. За счет его подачи уровень раствора в катодных ячейках превышает уровень в анодном пространстве. Католит просачивается через поры диафрагмы в анодное пространство ванны, препятствуя попаданию в катодное пространство примесей из анолита. После прохождения через диафрагму католит объединяется с анолитом и самотеком удаляется из ванны на очистку. Часть анодных примесей не растворяется и преимущественно осаждается в донной части анодного пространства ванны. Часть нерастворенных примесей формирует на поверхности анода нерастворимый шлам, в котором, в частности, концентрируются драгоценные металлы.

Осаждение товарного никеля осуществляется на никелевые основы, которые производятся в отдельных электролизных ваннах путем катодного осаждения никеля на титановые матрицы. Такие ванны, в отличие от ванн производства товарного никеля, называются матричными. Срок наращивания основ составляет 12–24 ч. Катоды с осажденными на них основами выгружаются, промываются, основы сдираются и правятся. К ним контактной сваркой привариваются вырезанные из основ ушки. Никелевые основы с приваренными ушками загружаются в товарные ванны для наращивания на них товарных никелевых катодов. Срок наращивания товарных катодов (катодная кампания) составляет 3–4 сут. По завершении катодной кампании товарные катоды выгружаются, промываются и передаются в дальнейшую обработку, включающую взвешивание, пробоотбор, резку, сортировку (разбраковку), фасовку (упаковку) первичного никеля для отправки партиями на склад готовой продукции.

Технология рафинирования ПНТП

Исходным сырьем процессов гидрометаллургического рафинирования в производстве электролитного никеля является восстановленный порошок трубчатых печей ПНТП. По химическому составу ПНТП близок к черновым никелевым анодам, однако содержит значительное количество кремния, кальция, магния и алюминия, поступающих в процесс с зольной составляющей угля, используемого на операции восстановления.

Технология переработки ПНТП включает в себя три основных блока: хлорное растворение в обедненном никелевом растворе, очистку от примесей и электроэкстракцию никеля.

Основным отличием процесса электроэкстракции от электрорафинирования черновых анодов является то, что в процессе используются нерастворимые аноды, и никель, осаждающийся из раствора под действием тока на катоды, не восполняется в электролите за счет растворения никеля из анодов. Таким образом, в раствор не переходят и соответствующие примеси.

Хлорное выщелачивание ПНТП в обедненном по никелю растворе после электроэкстракции осуществляется в аппаратах с псевдоожижением — цементаторах. В процессе хлорного растворения в жидкую часть пульпы извлекаются никель и основные примеси, при этом сульфидная сера и драгоценные металлы коллектируются в нерастворимом остатке, который направляется в производство драгоценных металлов. Раствор после хлорного растворения очищают от основной части поступающей с ПНТП меди на операциях предварительной и дополнительной медеоочистки в цементаторах. Цементная медь передается в производство меди.

Далее обогащенный никелем раствор хлорного выщелачивания очищается от примесей совместно с анолитом от рафинирования черновых анодов. Поскольку в растворах после хлорного выщелачивания содержание железа более высокое (сравнительно с черновыми никелевыми анодами), в качестве окислителя в процессе железоочистки используют кислородо-воздушную смесь с содержанием кислорода до 40 %.

В связи с повышенным содержанием в ПНТП цинка (сравнительно с черновыми никелевыми анодами) раствор после железоочистки подвергается экстракционной очистке от цинка. После очистки от остаточной меди (цементацией) и кобальтоочистки раствор передается в электролизные ванны. В качестве нейтрализатора в процессах железо- и кобальтоочистки используют основной карбонат никеля. Очищенный от примесей богатый никелем производственный раствор в качестве католита поступает в ванны электроэкстракции.

Электроэкстракция никеля осуществляется в полимербетонных электролизных ваннах с разделением катодного и анодного пространств проточной тканевой диафрагмой.

Часть обедненного по никелю раствора из катодного пространства ванны (~10%) по переливу поступает на объединение с раствором после

кобальтоочистки. Остальной раствор через анодную диафрагму под действием разрежения просачивается в анодные ячейки, препятствуя попаданию в катодное пространство хлора.

Из каждой анодной ячейки анолит совместно с анодным хлором эвакуируется за счет разрежения в бортовой коллектор ванны, где происходит разделение водной и газовой фаз. Часть анолита, насыщенного хлором, поступает на хлорное выщелачивание ПНТП, остальной анолит откачивается на передел дегазации и далее в электролизные ванны. Хлор-газ из бортовых коллекторов по вакуумным линиям транспортируется на операцию компримирования.

На переделе компримирования хлора и дегазации анолита осуществляют сбор хлор-газа из анодных ячеек ванн электроэкстракции, его сжатие и распределение хлора на переделы хлорного выщелачивания ПНТП и кобальтоочистки никелевого раствора.

Компрессоры, установленные на переделе, обеспечивают необходимое разрежение в анодных ячейках, бортовых коллекторах и хлоропроводе, а также необходимое сжатие хлор-газа. На хлоропроводах установлены охлаждаемые водой емкости-конденсаторы для осушки хлор-газа, поступающего на компримирование. Осушенный и сжатый газ (давление 1,0–1,5 бар) собирают в емкость, откуда по системе хлоропроводов он дозируется на переделы гидрометаллургического отделения цеха электролиза никеля.

Анолит из бортовых коллекторов нагревают в теплообменниках и откачивают насосами в вакуумные колонные дегазаторы. Разрежение в колоннах ($-0,8 \div -0,9$ бар) создается вакуум-насосами.

Удаляющийся из кипящего анолита хлор-газ поступает на компрессоры компримирования, анолит после вакуумного обесхлоривания откачивают на электролизный передел, где после дополнительной химической дегазации (восстановление остаточного хлор-газа в электролите раствором сульфита натрия) его объединяют с католитом, поступающим в электролизные ванны.

Технология производства карбонильного никеля

Сырьем для карбонильного производства служат никелевые гранулы, выплавляемые из продуктов обжигового отделения и собственных оборотов ЭПО РЦ, а также различных видов привозных металлосодержащих материалов других цехов в рафинировочном цехе.

Основными переделами процесса являются передел газификации пекового кокса, синтеза, ректификации и разложения тетракарбонила никеля.

Передел газификации предназначен для получения оксида углерода газификацией пекового кокса в газогенераторе. Полученный оксид углерода очищают от пыли водой в пенном аппарате и в скрубберах, при этом коксовая пыль смывается водой в водяные баки.

Передел синтеза предназначен для получения тетракарбонила никеля (ТКН) и осуществляется при взаимодействии твердых никельсодержащих материалов

с оксидом углерода при высоких давлении и температуре. Передел синтеза ТКН состоит из технологических секций, где расположены установки синтеза, коридор разводки трубопроводов, помещения пароперегревателя, камер приточной, вытяжной и аварийной вентиляции, узла производственного водоснабжения, пульта управления, административных и бытовых помещений, понизительной подстанции с пультом управления, помещений РП и ремонтных мастерских.

Циркуляция реакционного газа в процессе синтеза ТКН осуществляется циркуляционным компрессором, расположенным на переделе газовых компрессоров. После окончания загрузки сырья в колонны и закрытия верхних затворов система трубопроводов и аппаратов установки синтеза ТКН опресовывается азотом, затем после полного сброса давления промывочного газа включаются в работу циркуляционный компрессор и подогреватель газа. Подогретый реакционный газ (оксид углерода) подается в нижнюю часть колонны, проходит через слой сырья и извлекает из него никель в виде карбонила никеля. Кроме карбонила никеля, в процессе синтеза происходит образование карбониллов железа и кобальта.

Для восполнения убыли оксида углерода, который расходуется на образование карбониллов и частично растворяется в жидком карбониле, система непрерывно или периодически подпитывается «свежим» газом из ресиверов высокого давления.

Выходящий из колонн реакционный газ, содержащий пары карбониллов, проходит через выносной пылевой фильтр и направляется в холодильник-конденсатор (аппарат типа «труба в трубе»), где за счет снижения температуры газа до 10–40° С происходит конденсация паров карбониллов.

Конденсат отделяется от газа в системе сборников-отделителей, которые представляют собой горизонтальные цилиндрические аппараты высокого давления.

Реакционный газ из сборника-отделителя через маслоловушку направляется в циркуляционный компрессор, из которого подается в подогреватели и поступает вновь в колонны синтеза.

В сырой карбонил извлекается до 96–97 % никеля, до 15 % кобальта, до 70 % железа. Практически вся медь, сера и благородные металлы остаются в остатках синтеза, которые затем направляются на обжиг в трубчатой печи для полной дегазации и сульфатизирующего обжига остатков синтеза, обеспечивающего подготовку материала к переработке в цикле основного производства.

Передел ректификации предназначен для производства дистиллята тетракарбонила никеля, получаемого путем отгонки его из смеси нагретых карбониллов никеля, железа и кобальта, с последующей термической обработкой кубовых остатков с образованием остатков дожигания.

При нагревании исходного продукта в кубе карбонил никеля полностью испаряется, карбонил железа испаряется частично и в основном остается в кубе. В процессе ректификации поднимающиеся в колонне пары постепенно

обогащаются низкокипящим компонентом смеси, а стекающая вниз жидкость — высококипящим компонентом.

Пар, выходящий из верхней части ректификационной колонны, представляет собой чистый легколетучий компонент смеси, конденсация которого дает готовый продукт — дистиллят, основная часть которого направляется в соответствующие сборники для производства готовой продукции, а другая часть в виде флегмы остается в ректификационной колонне. Из нижней части куба отбирается продукт, богатый высококипящим компонентом, который является кубовым остатком, и дополнительно перегоняется в колоннах II ректификации.

Очищенные пары карбонила никеля конденсируются и охлаждаются в дефлегматоре (трубчатый теплообменник, охлаждаемый проточной холодной водой). Пары, не успевшие сконденсироваться в дефлегматоре, попадают в конденсатор остаточного газа, где происходит их окончательная конденсация. Часть конденсата направляется в колонну на орошение насадки (флегма), остальная часть (дистиллят) выводится из колонны в сборники, из которых давлением оксида углерода перекачивается в напорные баки отделения разложения, ОПУ дробы и спецпорошков.

Передел разложения тетракарбонила никеля предназначен для производства карбонильных никелевых порошков и карбонильной никелевой дробы путем термического разложения тетракарбонила никеля.

Выделившийся при разложении карбонила никеля оксид углерода направляется из разложителя на очистку от никелевого порошка, а затем — в газгольдеры оборотного газа.

Передел разложения состоит из пяти технологических секций, разделенных по горизонтали перекрытиями на три уровня. В каждой секции расположены четыре установки разложения, связанные через общий коллектор парообразного ТКН с башней, где установлены два напорных бака, два испарителя, буферная емкость, две газодувки и система обогрева испарителя.

Получение никелевых порошков с комплексом заданных физико-технологических свойств обеспечивается ведением процесса разложения паров ТКН при различных температурных режимах и различных количествах подачи паров ТКН в реторту разложителя.

Карбонильная никелевая дробь (ДНК) является одним из наиболее чистых продуктов никелевого производства. Благодаря исключительно низкому содержанию легкоплавких примесей ДНК используется для выплавки специальных жаропрочных сталей и сплавов для атомной и авиационной промышленности.

Технологии производства никеля из окисленных руд

На переработку поступает смесь руд. Руду сушат и агломерируют. Агломерат в смеси с коксом, сульфидизатором (железным колчеданом) и флюсом (известняком) плавят в шахтной печи на штейн. Штейн шахтных печей продувается в конвертерах до фэйнштейна, содержащего 78–79,5 % никеля;

0,3–0,5 % кобальта; 0,2–0,3 % железа; 0,8–2,5 % меди и 17–19 % серы. Файнштейн дробится, измельчается и обжигается в две стадии.

Первая стадия осуществляется в печах КС при температуре 900–950° С, при этом обеспечивается снижение содержания серы до 1,0–1,5 %. Полученный огарок полностью или частично подвергают хлорирующему обжигу для очистки от меди. С этой целью огарок печей КС в горячем состоянии смешивают с 10–15 % сильвинита и обжигают при температуре 700–750° С. Образующиеся при этом хлориды и сульфаты меди хорошо выщелачиваются горячим (70–80°С) слабым раствором серной кислоты. Выщелоченный огарок вместе с газоходной пылью, пылью электрофильтров и другими оборотными материалами поступает на вторую стадию окислительного обжига в трубчатой вращающейся печи (750–800° С в хвостовой части, куда идет загрузка, и 1250–1300° С в головной — в месте выгрузки) с целью получения закиси никеля, содержащей не более 0,02 % серы.

Полученная в результате двойного обжига закись никеля может быть восстановлена до металла в дуговых электропечах с восстановителем (нефтяной или пековый кокс). В последнее время в электропечь загружали железные отходы, поэтому получали не огневой никель, как раньше, а так называемый маложелезистый ферроникель, содержащий более 85 % никеля и 4–12 % железа, что, заметим, снижает требования по содержанию кобальта.

Полученный отвальный шлак гранулируется и выводится в отвал, газы очищаются от пыли и выбрасываются в атмосферу. Штейн поступает на конвертирование, куда также добавляются в качестве холодных присадок металлоотходы. Полученные газы от конвертеров очищаются от пыли в электрофильтре.

Файнштейн (78 % никеля) разливается в песчаные изложницы. Затем файнштейн дробится, мелется и поступает вместе с оборотной пылью в печь кипящего слоя (КС) для выжигания серы. Огарок далее подвергается хлорированию сильвинитом (смесь натриевой и калиевой солей), хлорированный огарок выщелачивается на перколяторе для максимального перевода меди и кобальта в раствор с получением мало-медистого твердого остатка (не более 0,05 % кислотнорастворимой меди). Фильтрат направляется на гидрометаллургическое извлечение никеля, кобальта и меди.

Твердый остаток далее подвергается второму обжигу в трубчатых печах до полного удаления серы. Полученная закись никеля (76 % никеля) является товарной продукцией¹⁸.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА НИКЕЛЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В таблице 4 приведены сведения о химических веществах процесса производства никеля.

¹⁸ Производство никеля и кобальта : ИТС НДТ 12-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

Таблица 4. Сведения о химических веществах процесса производства никеля

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
1	Никель	Основной процесс	Производство никеля	Целевой продукт, эмиссия (выбросы, сбросы)	7440-02-0	Твердое	Ni
2	Цинк	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	7440-66-6	Твердое	Zn

Сведения о веществе				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
Гигиенические нормативы ^{a)}				
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
0,05	1	-/0,001/0,00005	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Горючее вещество, пыль может воспламениться на воздухе: T_{св.} = 470° С. Нижний концентрационный предел распространения пламени 220 г/м³.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. Поражает органы дыхательной системы в результате продолжительного воздействия. Предполагается, что данное вещество вызывает раковые заболевания (канцерогенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: EC₅₀ = 0,174–0,311 мг/л (водоросли, 72 ч); NOEC = 0,057 мг/л (рыбы, 32 дня).</p>
–	–	–	–	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Горючее вещество. При контакте с водой выделяет воспламеняющиеся газы. В форме порошка спонтанно воспламеняется на воздухе (пирофорное вещество): T_{св.} = 310° С (аэрогель); 600° С (аэровзвесь). Концентрационный предел распространения пламени 480 мг/м³.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает слабое раздражение кожи и слизистых оболочек глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: LC₅₀ = 0,11–0,271 мг/л (рыбы, 96 ч); NOEC = 0,06 мг/л (водоросли, 72 ч).</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
3	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния, %:	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	–	Твердое	–
	а) более 70						
	б) 20-70						
	в) менее 20, включая:						
	Кремний диоксид				7631-86-9 (аморфный)	Твердое	SiO ₂
	а) аморфный в виде аэрозоля конденсации при содержании более 60 %; кремний диоксид аморфный и стеклообразный в виде аэрозоля дезинтеграции; кристаллический при содержании в пыли более 70 %				14464-46-1 (кристобалит)		
	б) кремний диоксид аморфный в виде аэрозоля конденсации при содержании от 10 до 60 %; кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли от 10 до 70 %				14808-60-7 (кварц)		
в) кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли от 2 до 10 %							

Таблица 4 (продолжение)

Сведения о веществе				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
Гигиенические нормативы ^{a)}				
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
0,02 (ОБУВ по кремнию диоксиду аморфному)	–		3	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного состава пыли. Данные по диоксиду кремния приведены ниже.
		0,15/0,05/–		
		0,3/0,1/–		
		0,5/0,15/–		
3/1	3	0,15/0,05/–	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Пыль кристаллического кремния (кварц, кристобалит) может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{c)}.</p>
6/2		0,3/0,1/–		
–/4		0,5/0,15/–		

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
4	Оксид никеля	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	1313-99-1	Твердое	NiO
5	Свинец и его соединения, кроме тетраэтилсвинца, в пересчете на свинец, включая:	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	–	–	–
	Свинец				7439-92-1	Твердое	Pb

Таблица 4 (продолжение)

Сведения о веществе				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
Гигиенические нормативы ^{a)}				
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
0,05	1	-/0,001/-	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. Поражает органы дыхательной системы в результате продолжительного воздействия. Может вызывать раковые заболевания (канцерогенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Может вызывать долгосрочные отрицательные последствия для водных организмов.</p>
-	-	-	-	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного вещества данной группы. Сведения по свинцу приведены ниже.
-/0,05	1	0,001/0,0003/ 0,00015	1	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Горючее вещество, пыль может воспламеняться на воздухе: T_{св.} = 270° С (аэрогель); 580° С (аэрозоль).</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Предполагается, что данное вещество вызывает генетические дефекты и раковые заболевания (мутагенное и канцерогенное действие). Может отрицательно повлиять на способность к деторождению или на неродившегося ребенка (репродуктивная токсичность), поражать органы (эндокринную систему, систему крови, почки и др.) в результате продолжительного воздействия.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: EC₅₀ = 0,6 мг/л (ракообразные, 48 ч); NOEC = 0,0034 мг/л (ракообразные, 48 ч).</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
6	Мышьяк и его соединения, кроме водорода мышьяковистого, включая:	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	–	–	–
	Мышьяк				7440-38-2	Твердое	As
7	Серы диоксид	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	7446-09-5	Газ	SO ₂

Таблица 4 (продолжение)

Сведения о веществе				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
Гигиенические нормативы ^{a)}				
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
–	–	–	–	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного вещества данной группы. Сведения по мышьяку приведены ниже.
0,04/0,01	1	–/0,0003/ 0,000015	1	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Токсично при вдыхании и проглатывании: LD₅₀ = 15–763 мг/кг (в/ж, крысы). Может вызывать раковые заболевания (канцерогенное действие), поражать органы (ЦНС, дыхательную систему, систему крови, печень, почки и др.) в результате однократного и продолжительного воздействия. Предполагается, что данное вещество может отрицательно повлиять на способность к деторождению (репродуктивная токсичность).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: EC₅₀ = 1,5 мг/л (ракообразные, 48 ч); EC₅₀ = 2,31 мг/л (ракообразные, 10 дней).</p>
10	3	0,5/0,05/–	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Токсично при вдыхании: LC₅₀ = 884,14 ррт (инг., крысы, 4 ч). Смертельная концентрация для человека 2660 мг/м³ (при вдыхании в течение 10 мин). Вызывает химические ожоги кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{c)}.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
8	Медь	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	7440-50-8	Твердое	Cu
9	Оксид меди	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	1317-38-0	Твердое	CuO

Таблица 4 (продолжение)

Сведения о веществе				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
Гигиенические нормативы ^{a)}				
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
1/0,5	2	–	–	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Горючее вещество, пыль может воспламеняться на воздухе: $T_{св.} = 270^{\circ} \text{C}$ (аэрогель); 700°C (аэрозвесь). Температурные пределы распространения пламени от -7°C до 400°C.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Вредно при проглатывании, может причинить вред при вдыхании: $LD_{50} = 300-500$ мг/кг (в/ж, крысы); $LC_{50} = 5110$ мг/м³ (инг., крысы, 4 ч). Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: $LC_{50} = 0,0068-0,0156$ мг/л (рыбы, 96 ч); $NOEC = 0,0165-0,245$ мг/л (водоросли, 72 ч).</p>
–	–	–/0,002/ 0,00002	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Вредно при проглатывании: $LD_{50} = 470$ мг/кг (в/ж, крысы). Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: $LC_{50} = 0,0384-0,2562$ мг/л (рыбы, 96 ч); $NOEC = 0,0157-0,164$ мг/л (водоросли, 72 ч).</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
10	Сульфат меди	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	7758-98-7	Твердое	CuSO_4
11	Хлорид меди	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	7758-89-6	Твердое	CuCl

Таблица 4 (продолжение)

Сведения о веществе				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
Гигиенические нормативы ^{a)}				
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
1,5/0,5	2	0,003/0,001/–	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Токсично при проглатывании: LD₅₀ = 300 мг/кг (в/ж, крысы). Минимальная смертельная доза для человека 50 мг/кг.</p> <p>Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. Может поражать органы дыхательной системы в результате продолжительного воздействия. Предполагается, что данное вещество вызывает генетические дефекты (мутагенное действие) и может отрицательно повлиять на способность к деторождению или на неродившегося ребенка (репродуктивная токсичность).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: EC₅₀ = 0,0058–0,0073 мг/л (ракообразные, 48 ч); NOEC = 0,0157–0,164 мг/л (водоросли, 72 ч). Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p>
1,5/0,5	2	–/0,002/ 0,00005	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Токсично при проглатывании, вредно при попадании на кожу: LD₅₀ = 140 мг/кг (в/ж, крысы). LD₅₀ = 1224 мг/кг (н/к, крысы). Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: LC₅₀ = 0,039 мг/л (рыбы, 96 ч); NOEC = 0,03 мг/л (водоросли, 7 дней). Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
12	Серная кислота	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	7664-93-9	Жидкое	H ₂ SO ₄
13	Хлор	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (выбросы)	7782-50-5	газ	Cl ₂

Таблица 4 (продолжение)

Сведения о веществе		Гигиенические нормативы ^{а)}		Краткое описание опасности и основные характеристики ^{б)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
1	2	0,3/0,1/0,001	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасна.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Смертельно при вдыхании: LC₅₀ = 375 мг/м³ (инг., крысы, 4 ч). Вызывает химические ожоги кожи, глаз и внутренних органов при случайном проглатывании: смертельная доза для человека 135 мг/кг. Поражает органы дыхательной системы в результате однократного и продолжительного воздействия.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вредно для водных организмов: LC₅₀ = 16–28 мг/л (рыбы, 96 ч). Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p>
1	2	0,1/0,03/0,0002	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Окисляющий газ: может вызвать или усилить возгорание.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Смертельно при вдыхании: LC₅₀ = 293 ppm (инг., крысы, 1 ч). Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Поражает органы дыхательной системы в результате однократного и продолжительного воздействия.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Чрезвычайно токсично для водных организмов: LC₅₀ = 0,014 мг/л (рыбы, 96 ч). Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
14	Кобальт	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (сбросы)	7440-48-4	Твердое	Co
15	Железо	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (сбросы)	7439-89-6	Твердое	Fe
16	Взвешенные вещества	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (сбросы)	–	–	–

Таблица 4 (продолжение)

Сведения о веществе				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
Гигиенические нормативы ^{a)}				
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
0,05/0,01	1	-/0,0004/ 0,0001	2	<p>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</p> <p>Горючее вещество, пыль может воспламениться на воздухе: T_{св.} = 370° С (аэрогель); 760° С (аэровзвесь).</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Вредно при проглатывании, смертельно при вдыхании:</p> <p>LD₅₀ = 550 мг/кг (в/ж, крысы); LC₅₀ = 500 мг/м³ (инг., крысы, 4 ч).</p> <p>При вдыхании и контакте с кожей может вызвать аллергическую реакцию.</p> <p>Предполагается, что данное вещество вызывает генетические дефекты (мутагенное действие). Может вызывать раковые заболевания (канцерогенное действие) и отрицательно повлиять на способность к деторождению или неродившегося ребенка (репродуктивная токсичность).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Может вызывать долгосрочные отрицательные последствия для водных организмов.</p>
-/10	4	-	-	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>В форме мелкодисперсной пыли может воспламеняться на воздухе.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>При вдыхании пыли вызывает раздражение верхних дыхательных путей, может поражать легкие в результате продолжительного воздействия (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Вызывает изменение органолептических свойств воды (растворимые в воде формы).</p>
-	-	0,5/0,15/0,075	3	<p>Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного состава взвешенных веществ.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Нарушают санитарный режим водоемов.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
17	pH	Основной процесс	Производство никеля	Эмиссия (сбросы)	–	–	–

Примечания

- a) Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”».
- b) Основные характеристики согласно справочным материалам и сведениям, представленным в базах данных по химическим веществам:
- База данных ChemADVISOR. – URL: <https://www.chemadvisor.com/Online> (дата обращения: 20.12.2021);
 - База данных Европейского Химического Агентства (ECHA). – URL: <https://echa.europa.eu/> (дата обращения: 20.12.2021);
 - База данных АРИПС «Опасные вещества». – URL: <http://www.rpohv.ru/online/> (дата обращения: 20.12.2021);
 - Гусева Т. В. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005.
- c) Согласно принятым на международном уровне подходам к классификации опасности химических веществ – Рекомендациям ООН «Согласованная на глобальном уровне система классификации опасности и маркировки химической продукции» (GHS). – URL: <https://unece.org/ru/ghs-rev7-2017> (дата обращения: 20.12.2021).

Идентификационные данные вещества:

Номер CAS (Chemical Abstracts Service), или CAS Number, – уникальный численный идентификатор химического вещества, внесенного в Реестр Химической Реферативной службы (подразделение Американского химического общества).

Таблица 4 (окончание)

Сведения о веществе				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
Гигиенические нормативы ^{a)}				
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
–	–	–	–	Не является химическим веществом. Значение показателя pH не должно выходить за пределы 6,5–7,5 для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового значения, а также водоемов рыбохозяйственного значения.

Показатели опасности, обусловленной физико-химическими свойствами вещества:

$T_{\text{св}}$ — температура самовоспламенения — наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества.

Показатели опасности, обусловленной токсикологическими свойствами вещества:

LC_{50} (Letal Concentration) — средняя смертельная концентрация в воздухе — концентрация вещества, вызывающая гибель 50% животных при 1- или 4-часовом ингаляционном (инг.) воздействии.

LD_{50} (Letal Dose) — средняя смертельная доза — доза вещества, вызывающая гибель 50% животных при однократном введении в желудок (в/ж) или нанесении на кожу (н/к).

Показатели опасности, обусловленной экотоксикологическими свойствами вещества:

LC_{50} (Letal Concentration) — средняя смертельная концентрация — концентрация вещества в воде, вызывающая гибель 50% водных организмов (гидробионтов) при установленном времени воздействия (96-часовом для рыб, 48-часовом для ракообразных, 72- или 96-часовом для водорослей) в течение заданного периода наблюдения.

EC_{50} (Effective Concentration) — средняя эффективная концентрация — концентрация вещества в воде, вызывающая негативный эффект (изменение тест-реакции, выраженной в гибели гидробионтов, снижении интенсивности размножения, снижении подвижности или других типичных поведенческих характеристик, а также в подавлении некоторых биохимических процессов, протекающих в клетках и ферментных системах) у водных организмов на 50% при установленном времени воздействия в течение заданного срока наблюдений.

NOEC (No Observed Effect Concentration), NOEL (No Observed Effect Limit), NOAEL (No Observed Adverse Effect Level), NOELR (No Observed Effect Loading Rate) — максимально недействующая доза — максимальная концентрация вещества в воде, при которой не происходит гибели водных организмов и/или не наблюдается иного видимого токсического эффекта на гидробионтов в пределах установленного времени воздействия в течение заданного периода наблюдения.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Сравнение технологий по ключевым показателям

В зависимости от условий залегания рудных месторождений и мощности залежей разработка осуществляется открытым и подземным способами.

Открытая разработка применяется, если рудное месторождение залегает неглубоко. Подземный способ применяется при залегании руд на значительной глубине.

Преимущества открытого способа добычи:

- уровень комплексной механизации и автоматизации горных работ обеспечивает высокую производительность труда и меньшие затраты на добычу полезного ископаемого;
- более безопасные и комфортные условия труда;
- более полное извлечение полезного ископаемого;
- меньшие удельные капитальные затраты на строительство.

Недостатки открытого способа:

- необходимость выемки значительно превышающих объем руды вскрышных пород, что составляет основную часть общих затрат;
- необходимость изъятия из пользования значительных площадей земли и изменение ландшафта;
- изменение гидрологической ситуации в районе добычных работ.

При подземном способе разработки объемы перемещаемых пустых пород по сравнению с открытым способом незначительны и требуют меньших площадей для их размещения. Обеспечивается сохранность земной поверхности.

Согласно приведенным в таблице 5 данным, удельная интенсивность газовой выделенности на открытых горных работах в пересчете на 1 м^3 скальной горной массы составляет $3,3 \times 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^3$, а на подземных — $1,05 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{м}^3$ условной окиси углерода (более чем в 300 раз меньше). Причиной этого являются активные окислительные процессы, протекающие при взаимодействии продуктов детонации (CO , NO_2) с влагой, содержащейся в рудничном воздухе как минимум в количестве 85–90%. В связи с локализацией продуктов детонации и термической диссоциацией воды, находящейся в подземных выработках, часть CO и часть NO_2 окисляются до своих высших оксидов и затем поглощаются водой, то есть переходят в слабые угольную и азотную кислоты. На открытых же горных разработках в связи с мгновенным расширением взрывных газов и быстрым падением их температуры активность окислительных процессов существенно ниже. Относительная влажность воздуха в карьерах всегда меньше, чем в шахтах, поэтому снижается количество окислителя (гидроксильные группы), поступающего в рудничный воздух за счет термической диссоциации воды. Около 50% продуктов взрыва выдается вентиляторами и адсорбируется горной массой, а потому длительное время находится в подземных выработках, создавая дополнительные благоприятные условия для их нейтрализации.

В таблицах 5 и 6 и на рисунке 8 приведена сравнительная характеристика открытой и подземной добычи.

Таблица 5. Сравнительные характеристики по экологии открытых и подземных горных работ (газовый фактор)

Показатель	Удельная интенсивность газовой выделению в атмосферу	
	На открытых работах, м ³ /м ³	На подземных работах, м ³ /м ³
Оксид углерода	$3,3 \times 10^{-2}$	$1,05 \times 10^{-4}$

Таблица 6. Сравнительные характеристики по экологии открытых и подземных горных работ (пылевой фактор)

Технологические процессы открытых горных разработок	Удельная интенсивность пылевыведения в атмосферу на открытых работах, г/м ³	Технологические процессы подземных рудников	Удельная интенсивность пылевыведения в атмосферу на подземных работах, г/м ³
Вскрышные работы и отвалообразование с применением роторно-конвейерных комплексов	0,0046–0,0130	Бурение шпуров при проходке подземных выработок	0,0005
Узлы перегрузки горной массы на экскаваторе, конвейерах, отвалообразователе	0,00027–0,01000	Взрывание шпуровых зарядов при проведении подземных выработок	0,0005
Отвалообразование с разгрузкой автосамосвалов	0,0066–0,3000	Транспортировка пустых пород из проходческих забоев в отвалы	0,0003
Бурение взрывных скважин	356–110 370	Бурение взрывных скважин	0,0003
Выемочно-погрузочные работы по схеме «экскаватор – автосамосвал»	11,5–15,1	Массовые взрывы в очистных блоках	0,0006
Транспортировка горной массы автосамосвалами	586–980	Разгрузка скипов в приемные бункеры	12–15
Разгрузка автосамосвалов или железнодорожных вагонов в приемную воронку дробилки	25–30	Дробление, сортировка и складирование руды	13–15
Массовый взрыв	0,03–0,18	Погрузка руды в железнодорожные вагоны	30–35

Источник: Добыча и обогащение руд цветных металлов : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 23-2017 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

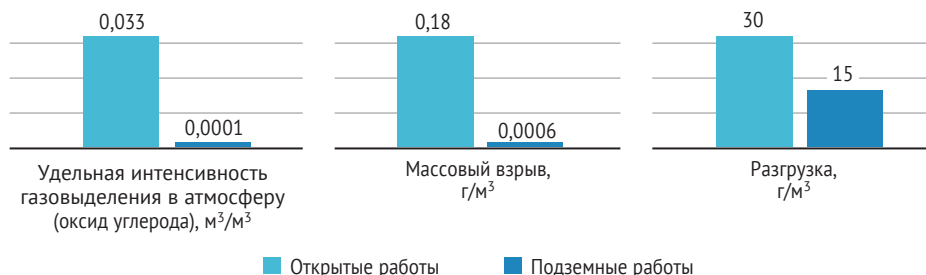


Рис. 8. Сравнительная характеристика открытой и подземной добычи

В рудных шахтах и карьерах отмечены многочисленные случаи выделения природных газов, сероводорода, углекислого и сернистого газа. Причем если H_2S , SO_2 и CO_2 из-за их высокой растворимости в шахтах практически полностью поглощаются водой и в атмосферный воздух не выбрасываются, то на карьерах они поступают в атмосферу. Обводненные выработки шахтной вентиляционной сети являются хорошими естественными фильтрами, поэтому и пылевые выбросы в атмосферу незначительны: удельная интенсивность пылевыведений в воздушный бассейн на открытых разработках достигает $111\ 695\ \text{г/м}^3$, а на подземных — до $66\ \text{г/м}^3$, то есть на несколько порядков ниже благодаря коагуляции и налипанию рудничной пыли на мокрую поверхность подземных выработок и последующему смыву ее водой. Особенно активно протекают процессы коагуляции и смыва пыли с поверхности выработок в восстающих и вентиляционно-выдающих стволах.

Оценивая уровни звукового давления и вибрационной скорости технологического оборудования, следует отметить, что общий уровень заболеваемости горнорабочих тугоухостью и вибрационной болезнью на открытых горных работах существенно выше, чем на подземных.

Сравнение технологий с использованием эксергетического анализа

О том, что некоторые вещества являются источниками энергии, известно с давних времен. Это в первую очередь различные виды топлива: дрова, каменный и бурый угли, торф, сланцы, нефть, природный газ. Химическая энергия топлива оценивается его теплотой сгорания, численно равной тепловому эффекту реакции его окисления (горения) в среде атмосферного воздуха при заданных условиях. Заранее установленными значениями теплоты сгорания топлива широко пользуются при решении целого ряда инженерных задач. В то же время замечено, что многие вещества обладают химической энергией, иногда не меньшей, чем у некоторых топлив, но проявляется и, следовательно, используется она не через горение, а, как правило, в результате осуществления процессов иного рода. Таким образом, очень многие вещества несут в себе некоторый потенциал энергии, но чтобы его рационально использовать, необходимо знать природу данного вида энергии и законы ее преобразования в другие формы при осуществлении всевозможных технологических процессов.

С проявлением химической энергии неэнергетического сырья и материалов приходится сталкиваться специалистам разных отраслей промышленности — химической, металлургической и т. д. Металлургам известно, что в процессах, в исходном сырье которых значительную долю составляют сульфиды металлов, выделяется большое количество энергии (тепла). Именно на использовании этой энергии основаны автогенные процессы черной и цветной металлургии и других отраслей. При нагревании и расплавлении концентратов идут десятки самых разнообразных химических реакций, в том числе и реакция окисления, частным случаем которой является горение в общепринятом смысле. Очевидно, что этот вид энергии оказывает существенное влияние на принципы

построения технологий переработки того или иного природного сырья, на технико-экономические, в том числе энергетические, характеристики рассматриваемого производства. И это обстоятельство должно учитываться как при разработке новых процессов, так и при анализе существующих. Понимая важность учета качества и состава исходного сырья при определении расходных характеристик, энергетических КПД рассматриваемых технологических процессов, специалисты разрабатывают различные новые способы и понятия. К последним относятся понятия химической энергии и эксергии вещества, которые впервые ввел (и предложил методы их определения) польский ученый Я. Шаргут. При изучении различных технологических процессов посредством составления и анализа их энергетических балансов появляется необходимость определения химической энергии и эксергии большого числа нетопливных материалов, являющихся сырьем, продуктами и отходами этих процессов (руды, концентраты, штейны, флюсы, кеки и другие материалы). Точно рассчитать значения энергетических характеристик таких материалов, используя методику определения химической энергии и эксергии для однородных веществ. Это объясняется тем, что для них, как и для технических топлив, часто не удается установить химические связи между отдельными группами, входящими в состав рассматриваемого материала.

Технологии построены таким образом, что подавляющая часть химической энергии сырья бесполезно теряется на стадиях его предварительной подготовки. В настоящее время в мире наибольшее распространение получили пирометаллургические способы производства никеля — отражательная и шахтная плавки, электроплавка, различные автогенные процессы. Повышение доли последних является направлением технического прогресса в отрасли, поскольку эти процессы (кислородно-взвешенная плавка, кислородно-взвешенная электротермическая плавка, плавка в жидкой ванне и т. д.) являются наиболее эффективными. Как уже было сказано ранее, каждое вещество обладает определенной химической энергией и эксергией, которые проявляются, когда это вещество становится сырьем для производства какого-либо продукта. Большие значения химической энергии имеют органические соединения, а из неорганических — многие металлы и их сульфиды, которые часто являются компонентами перерабатываемого природного сырья. В технологической установке эта энергия высвобождается, и если организовать производство таким образом, чтобы использовать химическую энергию сырья с максимальной эффективностью, то можно в значительной степени сократить расход так называемых традиционных энергоресурсов и энергоносителей в виде топлива, электрической и тепловой энергии, а в некоторых случаях даже генерировать их попутно с целевыми продуктами. Именно это направление технического прогресса в настоящее время является одним из главных в тех отраслях, где сырье и материалы обладают большой химической энергией.

В настоящее время в мире разработано несколько разновидностей взвешенной плавки: 1) взвешенная плавка на подогретом воздушном дутье; 2) кислородно-взвешенная или факельная плавка; 3) плавки в расплаве (плавка Ванюкова).

Рассмотрим плавку никелевого концентрата на штейн. Так как она является основным пирометаллургическим процессом переработки сульфидного никелевого концентрата, то далее будет представлен его энергетический баланс.

Взвешенная плавка на подогретом дутье осуществляется в специальном агрегате, в реакционной шахте которого в факеле, образуемом при горении мелкоизмельченных и глубоко высушенных сульфидных материалов в струе предварительно нагретого до необходимой температуры воздуха, совмещаются процессы обжига и плавления перерабатываемого сырья¹⁹.

Важнейшим критерием технического уровня того или иного процесса и его экономической целесообразности становятся затраты энергии не только непосредственно на его реализацию, но и связанные с осуществлением всего комплекса процессов, объединенных с рассматриваемым в общую технологическую схему. Иначе говоря, делаются попытки сравнивать по энергозатратам не отдельные процессы, а технологии производства заданной продукции с учетом расходов энергии на вспомогательные переделы, такие как переработка газов для извлечения полезных продуктов (серной кислоты, жидкого SO₂, элементарной серы) или их обезвреживание, производство технического кислорода, переработка шлаков и т. п. В печах взвешенной плавки можно перерабатывать концентраты, обладающие достаточно высоким энергетическим потенциалом, который в полной мере характеризуется значениями их химической энергии и эксергии. В таблице 7 приведены характеристики никелевых концентратов из руд нескольких месторождений. Анализ показывает, что в зависимости от химического состава и соотношения основных компонентов, определяющих энергетическую и технологическую ценность концентратов, удельные значения химической энергии и эксергии могут изменяться в широком диапазоне (для сравниваемых четырех концентратов — в 2,5 раза).

Таблица 7. Зависимость удельной химической энергии и эксергии сырья от его состава

Концентрат	Содержание основных компонентов, %				Энергия, МДж/т	Эксергия, МДж/т
	Cu	Ni	Fe	S		
1	4,48	9,2	25,36	33,65	8913	8283
2	6,60	10,4	30,80	32,50	9280	8416
3	4,75	1,6	36,70	32,63	9618	8779

По этим характеристикам можно осуществлять предварительную оценку наиболее пригодной технологии переработки располагаемого сырья. Вместе с тем очевидно, что принимать решение о способе переработки какого-либо сырья можно лишь после тщательных металлургических и энергетических исследований технологий и составления энергетического баланса для каждой из них. Процедура такого исследования приведена далее на примере взвешенной

¹⁹ Степанов В. С. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ. — Иркутск, 2013.

плавки никелевого концентрата. На основе результатов полного энергетического баланса выполнена оценка уровня энергоиспользования процесса взвешенной плавки на воздушном дутье.

Процесс предназначен для плавления сульфидных концентратов во взвешенном состоянии. Шихта подается в реакционную шахту печи через горелки. Для окисления компонентов концентратов используется воздух, обогащенный кислородом и подогретый до температуры 200° С. Степень обогащения воздуха кислородом определяется составом шихты и выбирается по условию автогенного протекания процесса (максимальное обогащение 40% объемного содержания кислорода). В случаях, когда при максимальном обогащении дутья кислородом для нормального протекания процесса подведенной энергии оказывается недостаточно (уменьшилась химическая энергия шихты, возросли по какой-либо причине тепловые потери печи, уменьшился подогрев воздуха), в реакционную шахту подается природный газ. Расплавленные частицы шихты попадают на поверхность ванны отстойника. В отстойной зоне печи происходит расслоение сульфидно-силикатного расплава на шлак и штейн. Для поддержания заданной температуры шлака и штейна отстойная зона подогревается за счет сжигания в ней природного газа. Основную реакцию, протекающую в реакционной шахте печи, в общем виде можно представить следующим уравнением:



Эта реакция экзотермическая, и ее тепловой эффект во многих случаях при условии нагрева материала до температуры воспламенения серы обеспечивает самопроизвольный ход процесса без затрат энергии извне. Из реакционной шахты выходят три продукта плавки: расплавленные частицы шихты, которые оседают в отстойнике; окисленная мелкодисперсная пыль; отходящие газы, содержащие SO₂.

В отстойнике происходят основные реакции шлакообразования, обменные реакции и процесс физического разделения на штейн и шлак, обусловленный разностью их удельных весов²⁰.

Технологические газы плавки во взвешенном состоянии до восстановления имеют температуру 1450° С и содержание: SO₂ — 12,6%; H₂O — 8,5%; CO₂ — 5,5%; O₂ — 0,7%; N₂ — 72,0%. Процесс восстановления сернистых газов осуществляется в аптечке печи взвешенной плавки. В качестве восстановительного реагента используют измельченный уголь с минимальным содержанием летучих компонентов и золы. Углерод и летучие компоненты угольной пыли взаимодействуют с сернистым ангидридом, восстанавливая его до элементарной серы. На основе описанной схемы, данных химического анализа и расходных показателей процесса были рассчитаны его материальный и полный энергетический балансы на 1 т перерабатываемого в нем концентрата. Химическая энергия и эксергия топлива, сырья и других нетопливных материалов и продуктов рассчитывались по известной методике.

²⁰ Там же.

На рисунке 9 и в таблице 8 приведены материальный и полный энергетический балансы процессов, протекающих в реакционной шахте и отстойнике ПВП. На основе полученных результатов определены энергетический и эксергетический КПД процесса плавки никелевого концентрата — они примерно равны друг другу и составляют 30,3 и 31,7 % соответственно.

Таким образом, расчеты показали, что 86 % приходящей энергии на плавку никелевых концентратов составляет химическая энергия сырья и 9 % — топлива, причем расходуемого не на процесс плавки непосредственно, а на поддержание соответствующей температуры в отстойнике.

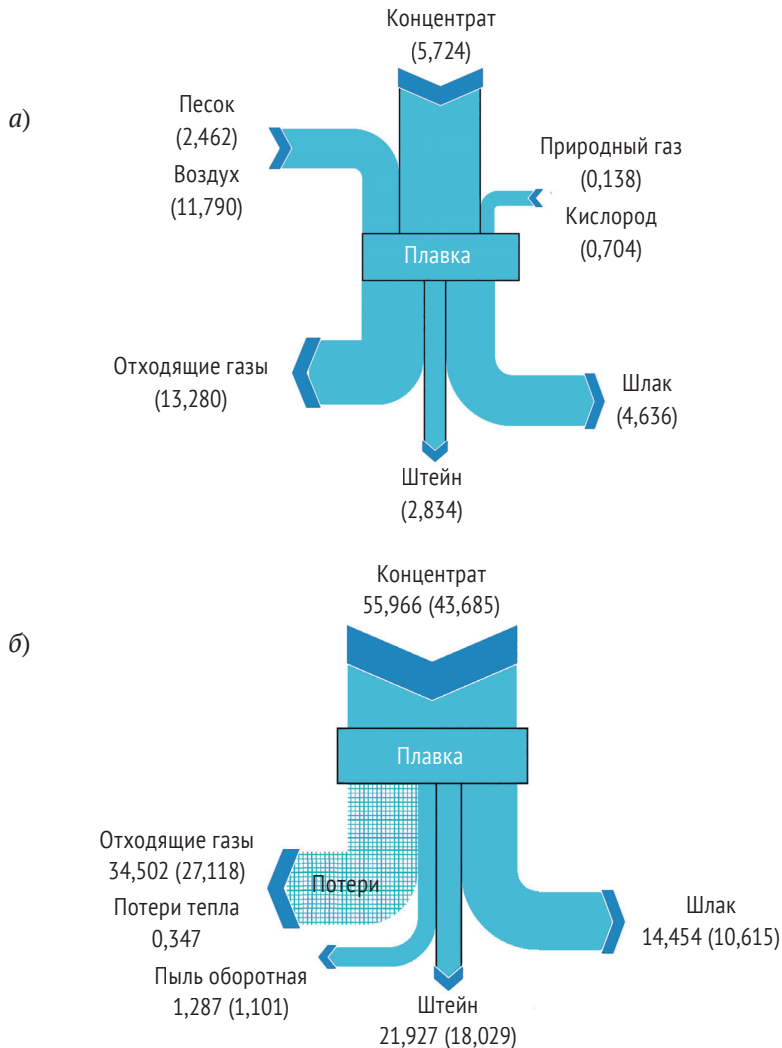


Рис. 9. Диаграмма балансов идеализированного производства никеля: а — материального, т; б — энергетического, ГДж (в скобках показаны значения эксергии)

Таблица 8. Материальный и полный энергетический балансы взвешенной плавки никелевых концентратов на 1 т Ni в штейне (реакционная шахта)

Статья баланса	Масса, т	Энергия, ГДж		Эксергия, ГДж	
		I_x	I_q	E_x	E_q
Приход					
Никелевый концентрат	5,724	55,966	0,0	43,685	0,0
Оборотная пыль	(1,230)	(10,302)	0,0	(8,407)	0,0
Песок	2,462	6,800	0,0	5,151	0,0
Природный газ	0,138	6,504	0,0	6,181	0,0
Кислород	0,704	–	0,0	–	0,0
Воздух	11,790	–	2,411	–	1,010
Электроэнергия	–	0,836	–	0,836	–
Итого	20,818	70,106	2,411	55,853	1,010
ВСЕГО		72,517		56,863	
Расход					
Штейн	2,834	19,292	2,635	15,825	2,204
Шлак	4,636	7,513	6,941	4,724	5,891
Пыль оборотная	(1,230)	(0,032)	1,287	(8,407)	1,101
Отходящие газы	13,280	16,127	18,375	11,440	15,678
Потери тепла	0,068	–	0,347	–	–
Итого	20,818	42,932	29,585	31,989	24,874
ВСЕГО		72,517		56,863	

ОТХОДЫ И ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ

Вторичная переработка и утилизация материалов — краеугольный камень глобальных инициатив, направленных на создание общества устойчивого развития. Как обозначено в сформулированных ООН «Целях в области устойчивого развития» — семнадцати целях, направленных на преобразование нашего мира, ответственное потребление и производство лежат в основе экономики замкнутого цикла и играют критически важную роль в противодействии изменению климата.

К отходам никелевой промышленности относятся шлаки, которые повторно возвращаются в металлургические процессы до максимального извлечения цветных металлов и только после этого переходят в отвальные. Таким образом, они в процессе переработки являются и вторичным сырьем, и отходами. К вторичному сырью относятся техногенные материалы.

Шламы электролитического рафинирования никеля являются одним из основных источников получения платиновых металлов. Поэтому переработке

шламов уделяют большое внимание. Из шламов электролиза сульфидных анодов получают, кроме того, селен и элементарную серу.

Электролиз металлических анодов. Шлам электролиза металлических анодов содержит обычно 30–35 % Ni, 20–25 % Cu, 1–2 % Fe, 0,4–0,6 % Co, 30–40 % S. В шлам переходят также практически все платиноиды. Содержание последних в шламах разных заводов колеблется в широких пределах — от 0,1 до 2 %.

Переработка шламов производится по различным технологическим схемам, учитывающим специфику данного шлама. Обычно вначале шлам обжигают с целью окисления сульфидов. Огарок подвергают выщелачиванию в серной кислоте, при этом в раствор переходят никель, железо, частично медь. Твердый остаток от выщелачивания плавят с восстановителем в электропечах, и полученный металлический сплав, содержащий в основном медь и платиноиды, отливают в аноды и подвергают электролизу в растворе серной кислоты. На катоде осаждается губчатая медь, содержащая некоторое количество платиноидов, основная же их масса выпадает в шлам. Губчатую медь растворяют в серной кислоте в присутствии кислорода. Платиновые металлы остаются в остатке от выщелачивания. Этот остаток и шлам электролиза представляют собой концентрат платиновых металлов, содержание которых достигает в нем 50 %. Концентрат направляют на разделение и извлечение платиноидов на аффинажный завод.

Электролиз сульфидных анодов. Шлам сульфидных анодов содержит около 97 % элементарной серы, 0,7 % сульфидной серы, 1,3 % Ni, 0,3 % Cu, 0,6 % Fe, 0,15 % Se (в элементарном виде). Шлам плавят в котлах при температуре около 135° С, и расплав фильтруют на обогреваемых паром фильтрах. В фильтрат переходит до 95 % элементарной серы и селена, в остатке остаются сульфиды и платиноиды. Фильтрат подвергают дробной дистилляции для разделения серы и селена. Последние являются товарными продуктами. Остаток от фильтрации содержит около 50 % серы, остальное — металлы. Этот остаток плавят и отливают в аноды. Эти так называемые вторичные аноды содержат около 50 % Ni, 20 % Cu, 2 % Fe и 20–25 % серы, то есть являются также сульфидными. Их подвергают электролизу в тех же условиях, что и исходные, первичные сульфидные аноды. Шлам электролиза вторичных анодов содержит около 90 % элементарной серы, в него переходит также часть сульфидов и все платиноиды. Элементарную серу вторичного шлама отделяют плавлением и фильтрацией. Полученный вторичный остаток содержит около 10 % платиновых металлов и направляется на аффинаж²¹.

РОЛЬ ОТРАСЛИ В ЭКОНОМИКЕ

Потребление первичного никеля в 2021 г. выросло на рекордные 17 % относительно 2020 года, до 2,85 млн тонн. Сокращение объемов производства нержавеющей стали в Китае, вызванное энергетическим кризисом, было

²¹ Гальнбек А. А. Прикладная электрохимия. — Л., 1974.

компенсировано наращиванием выплавки в Индонезии и значительным ростом спросом на никель для производства аккумуляторных батарей по причине высоких темпов роста продажи электромобилей. В прочих сегментах потребления (помимо производства нержавеющей стали и аккумуляторных батарей) рост составил 9% на фоне восстановления экономики после острой фазы пандемии коронавируса и пополнения запасов по всей цепочке создания добавленной стоимости.

Потребление никеля по отраслям представлено на рисунке 10.



Рис. 10. Потребление никеля по отраслям в 2021 г., тыс. т

Производство нержавеющей стали продолжало оставаться основной отраслью применения. Добавление никеля в качестве легирующего элемента для стабилизации аустенитной структуры придает стали усиленную коррозионную устойчивость, жаропрочность, свариваемость, пластичность и устойчивость в агрессивных средах.

В аккумуляторной промышленности никель используется в качестве одного из основных компонентов при производстве прекурсоров катодного материала для аккумуляторных батарей. В 2021 г. потребление никеля в данном секторе выросло на 73%, до 369 тыс. т. Ключевым типом аккумуляторов являются литиево-ионные аккумуляторы (Li-ion) благодаря высокой энергоемкости и сохранению емкости батареи после относительно большого количества перезарядок.

Увеличение производства литиево-ионных аккумуляторов было обусловлено прежде всего электрификацией автотранспорта. В 2021 г. продажи электромобилей (подключаемых гибридов и автомобилей на аккумуляторных батареях) выросли более чем в два раза, до 6,5 млн единиц, а с 2015 по 2021 г. среднегодовой темп роста составил более 50%. Основными факторами роста электрификации транспорта являются государственное стимулирование, ужесточение экологических норм, улучшение технических характеристик аккумуляторов и удешевление производства батарейных ячеек.

Глобальная тенденция к электрификации транспорта продолжает набирать обороты, при этом за последний год в Китае, Европе и Северной Америке был отмечен постоянный рост инвестиций в направления, связанные с аккумуляторными батареями.

Потребление никеля в прочих отраслях (сплавы, гальванопокрытия, спецстали) в 2021 году увеличилось на 9%, или 41 тыс. тонн, на фоне постепенного восстановления экономической активности после острой фазы пандемии коронавируса при устойчиво высоком спросе со стороны конечных потребителей в автомобилестроении и транспортном машиностроении, а также строительном и нефтегазовом секторах.

Производство первичного никеля по отраслям в 2021 г. по отраслям представлено на рисунке 11.



Рис. 11. Потребление первичного никеля по отраслям в 2021 г., тыс. т

Общемировое производство первичного никеля можно условно разделить на производство высокосортного и низкосортного никеля.

Высокосортный никель производится в форме никелевых катодов, брикетов, карбонильной дроби и порошка, ронделей, а также химических соединений, как из сульфидного, так и из более распространенного и доступного латеритного сырья.

Низкосортный никель включает в себя черновой ферроникель, ферроникель, оксид никеля и utility-никель, производимые только из латеритного сырья.

В 2021 г. многие производители пострадали от связанных с пандемией коронавируса производственных ограничений. Несмотря на это, в 2021 г. выпуск первичного никеля увеличился на 167 тыс. тонн, или 7% год к году, и составил 2,69 млн т.

Производство высокосортного никеля в 2021 г. незначительно уменьшилось — на 2 тыс. тонн — и составило 984 тыс. т.

Выпуск металлического никеля составил 787 тыс. т. Негативное влияние оказали проблемы производственного характера, забастовки, а также трудности,

связанные с пандемией коронавируса, что не позволило производителям выйти на допандемийные объемы выпуска.

Производство химических соединений никеля, включая сульфат никеля из первичных источников сырья (за исключением сульфата, полученного путем растворения высокосортного никеля), составило 197 тыс. т в 2021 г. на фоне высоких продаж электромобилей и устойчивого спроса на никель со стороны сектора аккумуляторных батарей.

Сульфат никеля может быть произведен из различных видов сырья с использованием разных технологических процессов: напрямую из никелевых полупродуктов, таких как смешанный гидроксидный остаток, смешанный сульфидный остаток, никелевый файнштейн и неочищенный сульфат никеля (продукт медной цепочки) — либо же путем растворения высокосортного металлического никеля (в виде никелевых брикетов и порошка) или с помощью переработки вторичного сырья.

В 2021 г. объемы растворения металлического никеля (данный источник сырья используется для компенсации недостающих никелевых единиц) увеличились более чем вдвое в связи с дефицитом никелевых полупродуктов и задержек в запуске индонезийских проектов.

Принимая во внимание растущую значимость ESG-повестки, а также глобальные цели по достижению углеродной нейтральности, в 2021 г. «Норникель» начал производство углеродно нейтрального никеля. Производство никеля с нейтральным углеродным следом стало возможным благодаря компенсирующим мерам по снижению выбросов парниковых газов (CO₂) на всех этапах производства готовой продукции — от добычи руды до обогащения и рафинирования. Продукция компании имеет один из самых низких в отрасли показателей углеродного следа при полностью прозрачной производственной цепочке²².

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ОТРАСЛИ

В условиях глобального климатического кризиса и тренда на более осознанное отношение к окружающей среде «зеленая» энергия станет самым перспективным направлением бизнеса на ближайшие десятилетия. А все альтернативные источники и материалы для «экологичной» энергии превратятся в «новую нефть».

Только за 2019 г. развитие и вложения в альтернативную энергетику позволили создать 11 млн новых рабочих мест по всему миру. Глобальная пандемия COVID-19 еще больше подстегнула ученых и инвесторов думать об альтернативных источниках энергии, бережливом отношении к природе и сохранении экологии. Если те цели и программы, которые сегодня наметили для себя мировые лидеры в экономике, будут реализованы, уже к 2030 году мы получим 1,041 ГВт

²² Обзор рынка металлов // Норникель : [сайт]. — URL: <https://ar2021.nornickel.ru/commodity-market-overview> (дата обращения: 15.01.2022).

из возобновляемых источников энергии, а генерация «зеленой энергии» вырастет на 42 % относительно нынешних мощностей.

На сегодняшний день общемировые инвестиции в энергетику с низким содержанием углеродов выросли до беспрецедентных размеров. Целые секторы экономики постепенно переходят от ископаемых источников энергии к электричеству, получаемому с помощью новых технологий. Электродвигатели становятся главным трендом, причем не только в автомобилестроении. Ключевым аспектом в процессе этого перехода станет повышение спроса на металлы, которые лежат в основе современных технологий выработки и сохранения электроэнергии. Здесь и транспорт с минимальными выбросами в окружающую среду, и производство чистой энергии, и ее аккумулирование и сохранение в виде новых технологий производства батарей.

Одним из ключевых элементов в этой цепочке становится никель. Мало кто задумывается, что этот элемент является составной частью почти всех современных устройств, которыми пользуется и бизнес, и обычный потребитель — от компьютеров, мобильных телефонов или кухонных приборов до высокотехнологичной оборонной промышленности. Несмотря на то что мы подчас и не замечаем присутствие этого элемента в нашей жизни, сегодня он играет важнейшую роль в современной экономике устойчивого развития.

Разработку и добычу никеля ведут 25 стран. Лидеры — Россия, Канада и Австралия. Но хорошие перспективы по развитию этого рынка есть и в Центральной Азии. Современный процесс производства — от добычи до конечной переработки и включение в различные производственные процессы и утилизации — это еще и колоссальный рынок рабочей силы, в том числе высококвалифицированной, который обеспечивает работой миллионы людей в этих регионах. Благодаря своим уникальным свойствам никель позволит в ближайшее время достигнуть очень многих целей, которые ставит перед мировым сообществом ООН.

В современных электродвигателях этот металл играет одну из ключевых ролей, так как многие модели энергоемких батарей на 65 % и более состоят из сплавов никеля. Эта технология уже позволила значительно увеличить энергоемкость и при этом снизить себестоимость производства современных батарей.

Такая востребованность никеля, особенно в автомобильной промышленности, позволяет прогнозировать рост производства этого металла с 92 килотонн в 2020 г. до 2,6 мегатонн к 2040 г.

Сегодня технологический скачок в развитии электромоторов позволяет многим аналитикам прогнозировать, что уже к 2025 г. автомобили с электродвигателями займут до 10 % рынка всего автопрома в мире. Так, несколько месяцев назад разработчик новейших аккумуляторов StoreDot презентовал батарею, которая способна заряжаться за 5 мин. Пока таких показателей удалось достичь для батарей сравнительно малого объема (бытовые приборы, электроскутеры и пр.), однако технология в ближайшее время может быть доведена и до автомобильных аккумуляторов.

Помимо ключевой роли в производстве аккумуляторов для автопрома, никель стал важнейшим элементом при изготовлении ветряных турбин,

солнечных батарей, биоэнергетических установок и другого оборудования возобновляемых источников энергии. Он также широко применяется в сферах логистики и транспортировки, при производстве оборудования по очистке воды и изготовлении водопроводных труб и позволяет значительно сократить потери воды на всех этапах жизнедеятельности человека.

Никельсодержащие сплавы, используемые в кораблестроении, позволяют значительно сократить выбросы серы в мировой океан. Не менее важна роль никеля в пищевой промышленности: при производстве, переработке и хранении продуктов питания оборудование с использованием нержавеющей стали на основе никеля очищается и восстанавливается гораздо легче, быстрее и с меньшим ущербом для экологии.

Но что важнее всего в эпоху борьбы за экологию, никель — это полностью перерабатываемый материал, которому можно дать «вторую, третью... пятую жизнь» без потери качества и потребительских свойств. Это и есть главное в так называемой экономике замкнутого цикла, основанной на возобновляемых ресурсах, к которой сегодня стремятся все развитые страны²³.

Если никель становится одним из ключевых элементов в «зеленой» экономике, важно понять, как с наименьшим ущербом для экологии добывать этот металл. Если спрос будет расти, очевидно, можно ожидать и более активной, а значит, подчас варварской, неэкологичной технологии его добычи.

А между тем новые технологии сегодня позволяют осуществлять этичную по отношению к природе добычу столь значимого элемента таблицы и при этом сделать ее вполне выгодной.

Несколько лет назад я принял решение инвестировать в разработку и добычу никеля через компанию Kaznickel. Позже эта компания стала частью Battery Metals Technology — передовой компании, добывающей никель в Восточном Казахстане по самым современным экологическим стандартам ISR.

Сегодня разработана технология, позволяющая оставлять руду в земле и извлекать из нее минералы путем их растворения и закачки насыщенного раствора в поверхность, на которой могут быть восстановлены минералы. Эта технология в отличие от старых традиционных методов добычи позволяет не рыть огромные котлованы, не оставлять так называемые хвосты, не обезвоживать почву. Это более бережливая по отношению к природе технология. Затраты на производство снижаются, оно становится более гибким и мобильным при меньших масштабах.

Дальнейшее развитие сектора электроники и возобновляемых источников энергии будет только повышать роль никеля как ключевой составляющей новой экономики, и новые технологии должны помочь нам взять у природы все подаренные ею ресурсы, при этом сохранив ее для будущих поколений.

²³ Nickel's hidden green potential // Mining Magazine : eMagazine. — 2021. — April. — P. 22–24.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вторичная переработка и утилизация никеля — на пути к экономике замкнутого цикла // Никель. — 2018. — Т. 33, № 2. — С. 12.
2. Гальнбек А. А. Прикладная электрохимия : [учебное пособие для хим.-технол. специальностей вузов] / А. А. Гальнбек, П. М. Вячеславов, А. Ф. Алабышев ; под ред. А. Л. Ротиняна. — Ленинград : Химия, Ленинградское отделение, 1974.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [официальный сайт]. — URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_iskpolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_iskpolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 13.01.2022).
4. Добыча и обогащение руд цветных металлов : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 23-2017 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/556173697> (дата обращения: 13.01.2022).
5. Лисиенко В. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование : справочник в 3 книгах / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. — Москва : Теплотехник, 2003.
6. Обзор рынка металлов // Норникель : [сайт]. — URL: <https://ar2021.nornickel.ru/commodity-market-overview> (дата обращения: 15.01.2022).
7. Производство никеля и кобальта : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 12-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068891> (дата обращения: 27.01.2022).
8. Снурников А. П. Гидрометаллургия цинка / А. П. Снурников. — Москва : Металлургия, 1981.
9. Степанов В. С. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ / В. С. Степанов, С. В. Степанов. — Иркутск : Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2013.
10. Тарасов А. В. Производство цветных металлов и сплавов : Справочник в 3 т. (4 кн.) / А. В. Тарасов. — Т. 2 : Производство тяжелых цветных металлов. — Москва : Металлургия, 2001.
11. Техническая энциклопедия : Справочник физических, химических и технологических величин / глав. ред. Л. К. Мартенс. — Т. 14 : Мышьяка соединения — Оливин. — Москва : Советская энциклопедия, 1931.
12. Технологические схемы и режимы обогащения медно-никелевых руд // metallolome.ru : Научно-технический портал о металлургии, горной промышленности, машиностроении, обработке металлов, энергетике. — URL: <https://metallolome.ru/tehnologicheskie-shemy-i-rezhimy-oboga-8/> (дата обращения: 25.02.2022).
13. Уткин Н. И. Металлургия цветных металлов / Н. И. Уткин. — Москва : Металлургия, 1985.
14. Lederman D. Natural Resources, Neither Curse nor Destiny / D. Lederman, F. William. - Maloney, 2006.
15. Nickel's hidden green potential // Mining Magazine : eMagazine. — 2021. — April. — P. 22–24.