
СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ НИКЕЛЯ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Бобрева Любовь Александровна,

канд. тех. наук, доц. кафедры физика, биология и инженерные технологии, ФГАОУ ВО
«Мурманский арктический университет», РФ, г. Апатиты

Аннотация

В статье представлен комплексный анализ энергопотребления при электролизе никеля и обоснованы пути снижения удельного расхода электроэнергии. Рассмотрены физико-химические основы процесса, идентифицированы основные источники энергетических потерь, проведён сравнительный анализ технологических схем передовых предприятий. На основе количественных расчётов показано, что внедрение размерно-стабильных анодов, трёхмерных катодов, систем рекуперации тепла и цифрового управления позволяет снизить удельное энергопотребление на 15–25% при сроках окупаемости инвестиций от 2 до 5 лет. Особое внимание уделено системному подходу к энергоэффективности, включающему оптимизацию состава электролита, конструкции ячеек и режимов электролиза.

Ключевые слова: электролиз никеля, удельный расход электроэнергии, размерно-стабильные аноды, рекуперация тепла, энергоэффективность, выход по току, перенапряжение.

REDUCTION OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION DURING NICKEL ELECTROLYSIS: ANALYSIS AND PROSPECTS

Bobreva Lyubov Aleksandrovna,

PhD in Engineering, associate professor Department of Physics, Biology, and Engineering
Technologies, Murmansk Arctic University, Apatity, Russian Federation
email: dbobreva@yandex.ru

ABSTRACT

The article presents a comprehensive analysis of energy consumption during nickel electrolysis and substantiates ways to reduce specific energy consumption. The physico-chemical foundations of the process are considered, the main sources of energy losses are identified, and a comparative analysis of technological schemes of advanced enterprises is carried out. Based on quantitative calculations, it is shown that the introduction of dimensionally stable anodes, three-dimensional cathodes, heat recovery and digital control systems can reduce specific energy consumption by 15–25% with a payback period of 2 to 5 years. Special attention is paid to a systematic approach to energy efficiency, including optimization of electrolyte composition, cell design and electrolysis modes.

Keywords: nickel electrolysis, specific energy consumption, dimensionally stable anodes, heat recovery, energy efficiency, current output, overvoltage.

Введение

Никель является одним из наиболее востребованных цветных металлов, применяемым в производстве нержавеющей стали, аэрокосмических сплавов и, в последние годы, в производстве электромобилей. Электрохимическая очистка остаётся основным способом получения высокочистого никеля, обеспечивая около 60% мирового производства первичного никеля. Однако этот процесс характеризуется высокой энергоёмкостью: удельное энергопотребление составляет от 2800 до 3500 кВт·ч на тонну произведённого никеля.

Типичная установка электролиза никеля мощностью 100 000 тонн в год при потреблении 3000 кВт·ч/т генерирует более 100 000 тонн CO₂-эквивалента в год в зависимости от местного энергетического баланса. Учитывая, что затраты на электроэнергию составляют 30–40% общих производственных расходов, даже незначительное повышение энергоэффективности даёт существенные конкурентные преимущества и устойчивость к колебаниям цен на энергоносители.

Целью данной работы является на основе литературных данных и опыта передовых предприятий выявить и обосновать пути снижения удельного расхода электроэнергии при электролизе никеля.

Физико-химические основы процесса

Электрохимическое осаждение никеля производится из сульфатно-хлоридных, борфтороводородных и сульфаматных электролитов. Наиболее распространён сульфатно-хлоридный электролит. При электролизе на катоде происходят конкурирующие реакции разряда ионов никеля и ионов водорода:



Таким образом, выход по току при электроосаждении никеля не достигает 100%, так как часть тока расходуется на выделение водорода [1, 8].

Напряжение ячейки определяется стандартными энергиями Гиббса и стандартными потенциалами реакций на никелевых электродах. Для никель-молибденовых сплавов перенапряжение выделения водорода составляет около 0,18 В и сохраняется более 1500 часов непрерывной работы. Величина перенапряжения зависит от материала электрода и плотности тока [2].

Кинетические параметры электродных реакций, в частности выделения водорода на никеле в щелочной среде, получены как для свежеполированных никелевых электродов, так и для электродов, подвергнутых электрохимической обработке [3].

Конкурирующее выделение водорода снижает выход по току никеля, поэтому для минимизации энергопотребления состав электролита, температуру и плотность тока подбирают с учётом кинетики обеих реакций [5].

Основные параметры, определяющие удельный расход электроэнергии

Общее напряжение ячейки может быть выражено следующим образом [6]:

$$V = E + \eta_a + |\eta^*c| + IR \quad (3)$$

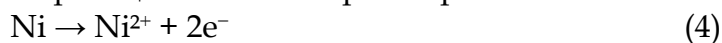
где E — термодинамический потенциал ячейки; η_a и η^*c — анодное и катодное перенапряжения соответственно; IR — омические потери.

Соотношение между выходом по току (CE) и удельным энергопотреблением (SEC) обратно пропорционально [7]:

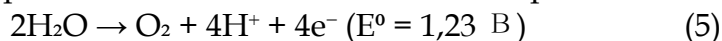
$$\text{SEC} = (V \cdot F) / (\text{CE} \cdot M \cdot \eta)$$

где V — напряжение ячейки (В); F — постоянная Фарадея (96 485 Кл/моль); M — молярная масса никеля (58,69 г/моль); η — механические потери в передаче электроэнергии.

При электролизе никеля с использованием растворимых никелевых анодов основной анодной реакцией является растворение никеля:



Анодное перенапряжение при растворении никеля относительно низкое (50–100 мВ) благодаря благоприятной кинетике на поверхностях никеля. Побочная реакция выделения кислорода создаёт дополнительные потери:



Перенапряжение этой реакции может достигать 300–500 мВ, что существенно увеличивает энергопотребление [4].

Катодное перенапряжение при осаждении никеля составляет 100–300 мВ в зависимости от состава электролита и плотности тока. Выделение водорода на никелевых катодах протекает с более высоким перенапряжением (400–800 мВ), что, однако, позволяет поддерживать выход по току никеля на уровне 92–97% [2, 8].

Расчёт теоретического минимума энергопотребления

Для количественной оценки эффективности реальных процессов необходимо сравнение с теоретическим идеалом. Теоретический минимальный расход электроэнергии на осаждение 1 тонны никеля, рассчитанный на основе закона Фарадея, составляет всего 228 кВт·ч/т. Однако с учётом неизбежных омических потерь и перенапряжений минимальный практически достижимый уровень для современного высокоэффективного производства оценивается в 3480 кВт·ч/т.

Расчёт показал, что при минимальном практически достижимом напряжении ячейки 3,7 В и эффективности по току 97% удельное энергопотребление составляет:

$$W = (2 \cdot 96485 \cdot 3,7) / (58,69 \cdot 3600 \cdot 0,97) \approx 3480 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$$

Таким образом, потенциал энергосбережения в реальных процессах оценивается в 15–25% по сравнению с базовым уровнем.

Сравнительный анализ передовых предприятий

Анализ эксплуатационных показателей пяти предприятий (Канада, Австралия, Россия, Китай, Финляндия), отличающихся высокой энергоэффективностью, позволил выявить ключевые факторы снижения энергопотребления.

Таблица 1 — Сравнительный анализ ключевых эксплуатационных параметров

Параметр	Стандарт	Канада	Австралия	Россия	Китай	Финляндия
Удельное энергопотребление (кВт·ч/тонна)	3000	2780	2680	2730	2520	2650
Среднее напряжение ячейки (В)	4,2	3,9	3,8	3,85	3,65	3,8
Плотность тока (А/м²)	300	320	350	330	450	340
Рабочая температура (°С)	60	65	62	60	58	60
Материал анода	Pb-Sb	Ti/IrO ₂	Ti/RuO ₂	Ti/IrO ₂ -Ta ₂ O ₅	Ti/RuO ₂	Ti/IrO ₂

Структура анода	Плоский лист	Плоский лист	Плоский лист	Плоский лист	Пенообразная структура	Плоский лист
Циркуляция электролита (л/мин/м ²)	5	7	6	10	4	5
Возврат тепла (%)	0	40	15	20	10	35

Наибольшая эффективность достигнута на китайском предприятии Jinchuan Group (2520 кВт ч/т), где внедрены трёхмерные никелевые пенокатоды, позволяющие работать при плотности тока 450 А/м² с напряжением ячейки 3,65 В. Применение размерно-стабильных анодов (DSA) с ММО-покрытием на титановой основе вместо свинцово-серебряных позволило снизить напряжение ячейки на 0,3–0,5 В на всех рассмотренных предприятиях [1, 6].

Экономическая эффективность DSA-анодов

Выполненный количественный расчёт для предприятия производительностью 50 000 тонн никеля в год показал, что снижение напряжения ячейки на 0,4 В при замене свинцовых анодов на DSA даёт:

Удельную экономию электроэнергии: 384,5 кВт ч/т

Годовую экономию: 19 226 000 кВт ч

Денежную экономию (при цене 0,06 /кВт·ч): более 1,15 млн /кВт·ч: более 1,15 млн /год

При капитальных затратах 8 млн \$ срок окупаемости составляет около 7 лет только за счёт экономии электроэнергии. С учётом увеличенного срока службы DSA-анодов (2–3 года против 3–6 месяцев для свинцовых) и снижения затрат на обслуживание срок окупаемости сокращается до 5 лет и менее, что подтверждается практикой внедрения на предприятиях Nickel West (BHP, Австралия) [1, 6].

Электролиз никеля сопровождается выделением значительного количества тепла. Расчёт теплового баланса для предприятия производительностью 50 000 т/год показал, что при потреблении 3000 кВт ч/т общее годовое энергопотребление составляет 150 млн кВт ч, из которых около 40% (60 млн кВт ч, или 51 588 Гкал) необратимо рассеивается в виде тепла [5, 7].

Внедрение систем рекуперации тепла на передовых предприятиях даёт следующие результаты:

В «Норильском никеле» утилизация тепла через пластинчатые теплообменники позволила сократить потребление газа на отопление на 75%, обеспечив экономию 190 кВт ч/т [6].

На предприятии Jinchuan Group применение тепловых насосов снизило энергоёмкость на 8,3% и потребление охлаждающей воды на 35% [1].

В Финляндии использование возобновляемой энергии (гидро- и ветрогенерация) для питания электролизных установок позволяет накапливать избыток никелевой продукции в периоды высокой выработки [7].

При утилизации 50% выделяемого тепла (25 794 Гкал) с использованием теплонасосных установок с коэффициентом преобразования 3,5 замещается около 3,2 млн м³ природного газа, что подтверждает экономическую целесообразность тепловой рекуперации.

Оптимизация состава электролита и применение добавок

Существенное влияние на энергоэффективность оказывает состав электролита. Оптимальная концентрация Ni²⁺ составляет 50–70 г/л. Содержание H₂SO₄ поддерживают в пределах 30–50 г/л, что повышает проводимость на 15% на каждые 10 г/л кислоты. Борная кислота (30–40 г/л) стабилизирует pH у катода, уменьшая выделение водорода [2, 4].

Ионы кобальта (0,1–1,0 г/л) улучшают свойства осадков и снижают внутреннее напряжение. По данным Jinchuan Group, добавление кобальта позволило снизить напряжение ячейки на 0,18 В и повысить выход по току на 2,3% [1].

Автоматизированные системы дозирования добавок на предприятии Nickel West (ВНР) снизили разброс энергопотребления на 40% и уменьшили средний удельный расход энергии. На Sumitomo Metal Mining (Япония) еженедельная обработка электролита активированным углём снижает энергопотребление на 180 кВт·ч/т по сравнению с традиционными методами [3].

Управление режимами питания

Замена тиристорных выпрямителей (SCR) на высокочастотные IGBT-выпрямители позволила на предприятии Glencore (Murrin Murrin, Австралия) снизить потери при преобразовании энергии с 6–7% до менее 2%, что эквивалентно экономии 180 кВт·ч/т [1].

Качество электрических соединений и автоматизированные системы управления непрерывно контролируют напряжение, ток, гармоники и коэффициент мощности. Внедрение таких систем на Jinchuan Group снизило общее энергопотребление на 7,3% [6]. Фильтрация гармоник в подразделении «Норильского никеля» снизила суммарные искажения с 18% до 3,5%, дав экономии 95 кВт·ч/т [6].

Заключение

Выполненный в работе анализ теоретических основ электролиза никеля и практического опыта передовых предприятий позволяет сделать обоснованный вывод о том, что проблема высокой энергоемкости процесса, характеризующегося удельным расходом электроэнергии на уровне 2800–3500 кВт·ч на тонну металла, имеет эффективные и экономически целесообразные решения. Показано, что основной вклад в энергопотребление вносят активационные перенапряжения электродных реакций, прежде всего анодного выделения кислорода и катодного восстановления водорода, а также омические потери в электролите и токоведущих шинах, что в совокупности обуславливает значительный разрыв между теоретическим минимумом энергозатрат, составляющим всего 228 кВт·ч/т, и практически достижимым уровнем около 3480 кВт·ч/т. Именно этот разрыв, достигающий 15–25% от текущего базового уровня, определяет реальный потенциал энергосбережения, который может быть реализован при комплексном подходе к модернизации производства, включающем три группы технологических решений: модернизацию электродных материалов (замена свинцово-серебряных анодов на размерно-стабильные аноды с ММО-покрытием, применение трехмерных пенокатодов), энергорекуперацию (утилизация низкопотенциального тепла и катодного водорода) и цифровизацию управления (IGBT-выпрямители, системы искусственного интеллекта для многопараметрической оптимизации процесса).

Выполненные количественные расчеты для условной установки мощностью 50 тысяч тонн никеля в год подтверждают высокую экономическую эффективность предлагаемых решений. Замена анодов на DSA-аноды, обеспечивающая снижение напряжения ячейки на 0,4 В, дает годовую экономию электроэнергии более 19 млн кВт·ч, что в денежном выражении составляет свыше 1,15 млн долларов США, при этом срок окупаемости капитальных затрат с учетом увеличенного срока службы анодов сокращается до пяти лет и менее. Оценка потенциала рекуперации тепла показала, что утилизация половины тепла, рассеиваемого в процессе (более 50 тысяч гигакалорий в год), с использованием тепловых насосов позволяет заместить около 3,2 млн кубических метров природного газа, что дает дополнительный экономический и экологический эффект. Наиболее впечатляющие результаты достигнуты при комплексной модернизации на предприятии Jinchuan Group в Китае, где сочетание DSA-анодов, пенокатодов, IGBT-выпрямителей с фильтрацией гармоник и автоматизированной системы управления на основе искусственного интеллекта

позволило снизить удельное энергопотребление с 3150 до 2380 кВт·ч/т, то есть на 23,2%, при окупаемости инвестиций в размере 28,5 млн долларов за 2,1 года.

Таким образом, достижение минимально возможного удельного расхода электроэнергии при электролизе никеля невозможно за счет какого-либо одного мероприятия и требует системной организации, включающей непрерывный мониторинг состава электролита и параметров процесса, автоматизацию дозирования добавок, поэтапное внедрение энергоэффективных технологий с приоритетом быстроокупаемых проектов, обучение персонала работе с цифровыми системами управления и интеграцию энергетического менеджмента в общую производственную стратегию. В условиях ужесточения экологических норм, роста стоимости электроэнергии и усиления конкуренции на глобальном рынке никеля внедрение рассмотренных решений становится не просто экономически выгодным, а необходимым условием сохранения конкурентоспособности и устойчивого развития предприятий в долгосрочной перспективе.

Список литературы:

1. Кочергин С.М., Победимский Г.Р. К вопросу о зависимости состава электролитических сплавов от условий электроосаждения // Тр. Казан. хим. техн. ин-та. — 1964. — Вып. 33. — С. 124-130.
2. Полукаров Ю.М. О зависимости скорости восстановления ионов металлов от потенциала нулевого заряда при электроосаждении сплавов // Электрохимия. — 1975. — Вып. 2, № 10. — С. 1461-1464.
3. Полукаров Ю.М., Семенова З.В. Структура и механические свойства осадков никеля, полученных в присутствии поверхностно-активных веществ // Электрохимия. — 1976. — Вып. 12, № 7. — С. 471-475.
4. Ротинян А.Л., Козич Е.С. Внутренние напряжения в катодных никелевых осадках // ЖПХ. — 1958. — Вып. 3.
5. Ротинян А.Л., Иоффе Э.Ш., Козич Е.С., Юсова Ю.И. О влиянии водорода на механические свойства электролитного никеля // ДАН СССР. — 1955. — Т. 104.
6. Береговский В.И., Кистяковский Б.Б. Металлургия меди и никеля: учебное пособие. — М.: Металлургия, 2016. — 456 с.
7. Уткин Н.И. Производство цветных металлов: учебное пособие. — М.: Интермет Инженеринг, 2017. — 442 с.
8. Баймаков Ю.В., Журин А.И. Электролиз в гидрометаллургии: учебное пособие. — М.: Металлургия, 2015. — 384 с.

References:

1. Kochergin S.M., Pobedimsky G.R. On the dependence of the composition of electrolytic alloys on the conditions of electrodeposition // Tr. Kazan. chemical engineering in-ta. — 1964. — Issue 33. — pp. 124-130.
2. Polukarov Yu.M. On the dependence of the reduction rate of metal ions on the zero charge potential during electrodeposition of alloys // Electrochemistry. — 1975. — Vol. 2, No. 10. — pp. 1461-1464.

3. Polukarov Yu.M., Semenova Z.V. Structure and mechanical properties of nickel precipitates obtained in the presence of surfactants // *Electrochemistry*. — 1976. — Issue 12, No. 7. — pp. 471-475.
4. Rotinyan A.L., Kozich E.S. Internal stresses in cathode nickel deposits // *Housing and communal services*. — 1958. — Issue 3.
5. Rotinyan A.L., Ioffe E.Sh., Kozich E.S., Yusova Yu.I. On the influence of hydrogen on the mechanical properties of electrolytic nickel // *DAN USSR*. — 1955. — Vol. 104.
6. Beregovsky V.I., Kistiakovsky B.B. *Metallurgy of copper and nickel: a textbook*. Moscow: Metallurgiya, 2016. 456 p.
7. Utkin N.I. *Production of non-ferrous metals: a textbook*. Moscow: Internet Engineering, 2017. 442 p.
8. Baimakov Yu.V., Zhurin A.I. *Electrolysis in hydrometallurgy: a textbook*. Moscow: Metallurgiya, 2015. 384 p.