

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЛИТОВЫХ ОТХОДОВ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ДЛЯ НАТРИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Любимова А.А., студент

Научный руководитель Гец А.К.

Белорусский национальный технический университет, Беларусь

*В статье обоснована возможность использования галитовых отходов Солигорска для создания натрий-ионных аккумуляторов. Описаны методы глубокой очистки сырья и синтеза компонентов батарей. Оценена экономическая выгода и экологический эффект от переработки солеотвалов. Предложен комплекс технологических мер для обеспечения ресурсосбережения.*

*Ключевые слова: галитовые отходы, калийное производство, Солигорский горнопромышленный район, натрий-ионные аккумуляторы, рациональное природопользование, вторичное сырье, глубокая очистка, электролит, энергосбережение, экологическая безопасность.*

Производство калийных удобрений — одна из ключевых отраслей экономики. Исторически добыча калийных солей оказывала значительное воздействие на окружающую среду. Примером такого воздействия является Солигорский горнопромышленный район, где за десятилетия разработки месторождения накопилось более 1 миллиарда тонн промышленных отходов. Масштабы проблемы обусловлены спецификой производства: из каждой тонны добытой руды лишь около 25–30% превращается в готовый продукт, в то время как остальная масса отправляется в отвалы. Сегодня солеотвалы и шламохранилища занимают более 1500 гектаров плодородных земель, формируя антропогенный ландшафт из гигантских терриконов. Они являются экологически опасными объектами, так как при вымывании атмосферными осадками соли из отвалов, происходит загрязнение прилегающих водоемов и засоление почв. По этой причине, поиск вторичных способов переработки отходов производства и снижение их площади хранения является приоритетной задачей для обеспечения экологической безопасности.

Решение этой проблемы, благодаря быстрому развитию технологий, находится в сфере альтернативной энергетики. Из-за глобального дефицита лития происходит быстрый переход к более недорогим и доступным натрий-ионным решениям, благодаря чему переработка отходов становится выгодным направлением. Так как натрий встречается в 500 раз чаще лития и является основным компонентом многомиллионных отвалов калийного производства, техногенные месторождения галитовых отходов могут быть интегрированы в производственный цикл создания компонентов натрий-ионных

аккумуляторов. Использование этого ресурса позволяет существенно снизить стоимость производства батарей, исключая затраты на дорогостоящую медь в пользу доступного алюминия.

В настоящее время натрий-ионная технология находится на этапе активных научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, в связи с чем специализированная нормативно-техническая база и национальные стандарты, регламентирующие методы испытаний именно для данного типа электрохимических систем, в полной мере еще не сформированы. Учитывая техническое сходство процессов заряда-разряда и конструктивных особенностей натрий-ионных и литий-ионных аккумуляторов была рассмотрена методология смежных отраслевых стандартов.

В частности, основным инструментом верификации параметров выбран ГОСТ Р МЭК 62660-1-2020 [1], регламентирующий требования к аккумуляторам для электротранспорта. В соответствии с разделом 4.2 данного стандарта, выбор измерительного оборудования обусловлен необходимостью минимизации погрешностей: так, система измерения тока (амперметр с внешним шунтом) должна иметь класс точности не ниже 0,5, а вольтметры для контроля напряжения — внутреннее сопротивление не менее 1 МОм/В.

Особое значение при тестировании ячеек на базе вторичного сырья имеет мониторинг термической стабильности, поскольку наличие остаточных примесей в переработанном сырье может влиять на внутреннее сопротивление. Согласно пункту 4.2.4, датчики температуры должны располагаться непосредственно на поверхности корпуса в точках, наиболее объективно отражающих тепловое состояние аккумулятора, независимо от его форм-фактора (призматического или цилиндрического). Использование такой стандартизированной измерительной базы позволит верифицировать параметры удельной емкости и плотности энергии разрабатываемых прототипов, обеспечивая научную обоснованность их последующего внедрения в системы накопления энергии.

Теоретическая возможность вовлечения галитовых отходов калийного производства в технологическую цепочку создания натрий-ионных аккумуляторов базируется на синтезе высокочистых солей электролита и активных масс катода. Основным компонентом, определяющим работоспособность аккумулятора, является гексафторфосфат натрия ( $NaPF_6$ ), который может быть получен путем прямого взаимодействия металлического натрия (продукта электролиза очищенного  $NaCl$ ) с гексафторфосфатом аммония ( $NH_4PF_6$ ) в среде тетрагидрофурана (ТГФ).

Процесс получения компонентов натрий-ионного аккумулятора из галитовых хвостов начинается с многоступенчатой глубокой очистки

исходного сырья методом селективного осаждения примесей и ионообменной хроматографии для достижения реактивной чистоты хлорида натрия от 99,5%.

Для синтеза катода очищенный хлорид натрия используется в качестве натрийсодержащего прекурсора в ходе твердофазного синтеза, где при высокотемпературном отжиге совместно с оксидами переходных металлов формируется кристаллическая структура слоистых оксидов или полианионных соединений типа  $Na_3V_2(PO_3)$ .

Получение электролита включает стадию конверсии очищенного галита в гексафторфосфат натрия ( $NH_4PF_6$ ) с последующим растворением полученной соли в смеси апротонных органических карбонатов, что в совокупности обеспечивает создание функционально активных электрохимических пар на основе вторичного минерального сырья.

Теоретическая емкость катодных материалов, синтезированных на основе натриевого сырья, составляет порядка 130 мАч/г. Надежность таких систем подтверждается способностью электролита выдерживать напряжение до 4.2–5.5 В без разрушения. При сборке ячеек чрезвычайно важным является этап каландрирования электродов до достижения пористости 35–40%, что гарантирует оптимальный ионный транспорт [2].

Переход от закупки коммерческих реактивов к собственному синтезу на основе вторичного сырья позволит снизить себестоимость электролита более чем в 15 раз. Это создает условия для создания эффективных систем накопления энергии, где стоимость всей батареи может быть снижена на 6–10% за счет совершенствования сырьевой базы.

Эффективность применения вторичных ресурсов в производстве батарей напрямую зависит от соблюдения отраслевых стандартов чистоты и стабильности материалов. Важным технологическим ориентиром является достижение чистоты синтезируемых солей на уровне не менее 99,5%. Содержание остаточной влаги в электролите должно строго ограничиваться порогом в 60 ppm, поскольку превышение этого значения инициирует необратимые химические процессы, ведущие к деградации ячеек.

С точки зрения электрохимических характеристик, целевым показателем для катодных масс выступает удельная емкость порядка 130 мАч/г при обеспечении стабильного окна напряжений от 1,0 до 4,2 В (с теоретическим пределом электрохимической стабильности электролита до 5,5 В). Важным параметром при формировании структуры электродов методом каландрирования является достижение пористости активного слоя в диапазоне 35–40%. Данный показатель признан международным стандартом для обеспечения баланса между плотностью энергии и эффективным ионным транспортом.

Переработка галитовых отвалов позволяет одновременно решить две важные задачи: обеспечить производство натрий-ионных аккумуляторов доступным сырьем и существенно снизить экологическую нагрузку на регион.

Галитовые хвосты, содержащие от 95% до 98% хлорида натрия, представляют собой стратегически важную и практически неисчерпаемую ресурсную базу для синтеза активных компонентов катодных материалов и приготовления высокочистых электролитов.

Анализ существующих мировых практик и литературных данных подтверждает, что достижение требуемой для аккумуляторных технологий чистоты сырья технически реализуемо через применение методов многоступенчатой перекристаллизации, ионного обмена и химического осаждения примесей кальция и магния. Переработка галитовых отвалов позволяет одновременно решить две важные задачи: обеспечить производство натрий-ионных аккумуляторов доступным сырьем и существенно снизить экологическую нагрузку на регион.

Производство комплектующих из галитового сырья закладывает основу для формирования в Республике Беларусь высокотехнологичного производства аккумуляторных батарей. Создание собственной компонентной базы позволит не только снизить импортозависимость отрасли, но и обеспечит благоприятные условия для привлечения прямых инвестиций в развитие производства.

#### **Литература:**

1. Аккумуляторы литий-ионные для электрических дорожных транспортных средств. Часть 1. Испытания по определению рабочих характеристик : ГОСТ Р МЭК 62660-1—2020. – Введ. 01.01.21. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 32 с.
2. Ould, D. M. C. New Route to Battery Grade NaPF<sub>6</sub> for Na-Ion Batteries: Expanding the Accessible Concentration / D. M. C. Ould, S. Menkin, C. A. O'Keefe // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2022. – Vol. 61, № 5. – P. 2-38.