

УДК 544.6

ЕМТЫЛЬ Д.Р., студент гр. 25-СБ-СТ5,
ТЛЕХУСЕЖ М.А., доцент, к.х.н., доцент,
Научный руководитель ТЛЕХУСЕЖ М.А., доцент, к.х.н.,
КубГТУ, г. Краснодар

НАТРИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ – ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ АЛЬТЕРНАТИВА ЛИТИЙ-ИОННЫМ

Аннотация: В статье анализируются натрий-ионные аккумуляторы (НИА) как потенциальная экологически чистая альтернатива доминирующим на рынке литий-ионным аккумуляторам (ЛИА). Освещаются ключевые проблемы ЛИА, связанные с ограниченностью запасов лития, экологическими последствиями добычи сырья (включая кобальт) и геополитическими рисками. Проводится сравнительный анализ принципов работы и материалов НИА и ЛИА. Подчеркиваются основные преимущества НИА: практически неограниченная и доступная ресурсная база (натрий), меньший экологический след производства, возможность отказа от кобальта, а также повышенная эксплуатационная безопасность и потенциально более простая утилизация. В качестве основного технологического ограничения НИА указывается их относительно низкая плотность энергии, что ограничивает их применение в портативной электронике. Однако, НИА являются не полной заменой, а важным дополнением к ЛИА, способным занять нишу в крупномасштабных стационарных системах хранения энергии и способствовать переходу к более устойчивой и ресурсосберегающей энергетике.

Ключевые слова: натрий-ионные аккумуляторы, литий-ионные аккумуляторы, экологичность, плотность энергии, хранение энергии, доступность ресурсов.

Развитие современных технологий неразрывно связано с необходимостью эффективного и безопасного накопления энергии, что особенно актуально в контексте перехода к возобновляемым источникам. На сегодняшний день доминирующее положение на рынке химических источников тока занимают литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) благодаря их высокой плотности энергии и длительному сроку службы [1]. Однако их широкое распространение выявило ряд существенных проблем, в первую очередь связанных с ограниченностью запасов лития, его неравномерным распределением по планете, а также экологическими последствиями добычи и переработки этого металла, что стимулирует активный поиск альтернативных аккумуляторных технологий. Поэтому натрий-ионные аккумуляторы (НИА) становятся предметом пристального внимания научного сообщества и промышленности, позиционируясь как потенциально более экологически устойчивая и ресурсосберегающая замена литиевым аналогам [2].

Литий-ионные аккумуляторы и натрий-ионные аккумуляторы относятся к классу аккумуляторов с ионами-качалкой, где хранение и высвобождение энергии происходит за счет обратимого перемещения ионов между катодом и анодом через электролит.

Литий-ионные аккумуляторы представляют собой перезаряжаемые химические источники тока, в которых в процессе разряда ионы лития (Li^+) мигрируют от анода (обычно графита) через неводный электролит к катоду (чаще всего оксиды металлов, таких как литий-кобальт-оксид, литий-железо-фосфат или литий-никель-марганец-кобальт-оксид) [1]. Благодаря малому размеру иона лития и его низкому атомному весу, ЛИА обеспечивают высокую плотность энергии (удельная энергия) и удельную мощность, что сделало их незаменимыми для портативной электроники и электромобилей.

Натрий-ионные аккумуляторы работают по схожему принципу, но вместо ионов лития используют ионы натрия [3]. В процессе разряда ионы натрия перемещаются от анода (чаще всего твердого углерода) к катоду (как правило, слоистые оксиды натрия или материалы на основе берлинской лазури). Основное отличие НИА кроется в большем размере иона натрия по сравнению с литием, из-за которого возникает необходимость использования иных электродных материалов, способных принять более крупный ион, и обуславливает их текущее технологическое ограничение в плотности энергии.

Основное экологическое преимущество натрий-ионных аккумуляторов кроется в изобилии и доступности исходного материала – натрия. Этот элемент является шестым по распространенности в земной коре. Он может быть легко получен из поваренной соли или морской воды, что делает его практически неограниченным ресурсом, в корне отличающимся от относительно дефицитного и дорогостоящего лития [2]. Ресурсное превосходство имеет прямое влияние на снижение себестоимости производства НИА и уменьшение геополитических рисков, связанных с поставками сырья, что является важным фактором для энергетической безопасности [3].

С точки зрения воздействия на окружающую среду процессы добычи и переработки натриевого сырья считаются менее энергоемкими и токсичными по сравнению с литием, кобальтом и никелем, которые часто используются в катодах ЛИА. В производстве НИА существует возможность отказа от использования кобальта, одного из наиболее проблемных с этической и экологической точек зрения компонентов в литий-ионной химии [3]. В анодах НИА часто применяется твердый углерод. Он также является более доступным и экологичным материалом по сравнению с графитом, используемым в ЛИА, или перспективными, но более сложными в производстве материалами [2]. Использование менее редких и токсичных материалов в НИА способствует меньшему воздействию на окружающую среду при добыче и производстве, делая их более привлекательными для реализации принципов ресурсосберегающей энергетики.

Вопросы безопасности и утилизации также вносят существенный вклад в оценку экологической чистоты аккумуляторных систем. Натрий-ионные аккумуляторы демонстрируют повышенную безопасность в эксплуатации по

сравнению с литий-ионными, в связи с их химическим составом и свойствами [3]. Они обладают меньшей склонностью к тепловому разгону, могут безопасно транспортироваться и храниться в полностью разряженном состоянии (при нулевом напряжении), что значительно упрощает логистику и снижает риски при аварийных ситуациях.

Низкая токсичность компонентов НИА и их широкая распространенность упрощают процессы вторичной переработки отходов. Несмотря на то, что полная технология утилизации НИА еще находится на стадии разработки и оптимизации, ожидается, что она будет менее затратной и более экологичной, чем сложная и дорогостоящая переработка ЛИА с извлечением редкоземельных металлов [2]. Возможность замены дорогостоящих и экологически проблемных материалов на более дешевые и безопасные компоненты, такие как натрий, железо и марганец, потенциально обеспечивает заверченный жизненный цикл аккумулятора с минимальным негативным воздействием на окружающую среду.

Несмотря на явные экологические и ресурсные преимущества, натрий-ионные аккумуляторы пока не могут полностью конкурировать с литий-ионными по ряду эксплуатационных характеристик. Основным технологическим ограничением НИА является их относительно низкая плотность энергии по сравнению с передовыми ЛИА, которая связана с большим размером иона натрия, который затрудняет его диффузию в электродных материалах.

ЛИА, благодаря своим физико-химическим свойствам, могут обеспечивать плотность энергии до 300 Вт·ч/кг, тогда как современные НИА пока находятся в диапазоне 100–160 Вт·ч/кг [3]. Их разница в плотности энергии ограничивает применение НИА в тех областях, где максимальная энергоемкость при минимальном весе критически важна, например, в большинстве электромобилей и портативной электронике.

Тем не менее, интенсивные научные исследования и разработки, в том числе направленные на создание новых катодных материалов (таких как слоистые оксиды, соединения на основе берлинской лазури и полианионные соединения) и оптимизацию твердоуглеродных анодов, постоянно улучшают производительность НИА [4]. Уже сегодня НИА достигают достаточной плотности энергии и демонстрируют длительный срок службы (более 2000-3000 циклов), делая их идеальным решением для крупномасштабных стационарных систем хранения энергии (например, для балансировки сети возобновляемых источников) и других приложений, где низкая стоимость, безопасность и экологическая чистота важнее максимальной удельной энергии [2].

Таким образом, натрий-ионные аккумуляторы не обязательно должны полностью заменить литий-ионные, но могут стать их эффективным дополнением, существенно снижая общую зависимость мировой энергетики от дефицитного лития и способствуя созданию более устойчивой и ресурсосберегающей энергетической инфраструктуры. Вопрос о том, являются ли натрий-ионные аккумуляторы экологически чистой альтернативой литий-ионным, требует комплексного ответа. С точки зрения ресурсной базы и низкой токсичности сырья, а также потенциально более простой и безопасной

утилизации, НИА обладают значительными экологическими преимуществами. Использование доступного натрия вместо дефицитного лития и отказ от кобальта способствуют снижению негативного воздействия аккумуляторного производства на окружающую среду. Однако, полная оценка экологической чистоты требует учета всего жизненного цикла и энергозатрат на производство, где НИА еще предстоит пройти путь оптимизации. В итоге, натрий-ионные аккумуляторы представляют собой не просто альтернативу, а важный шаг к созданию более устойчивой и диверсифицированной энергетической системы. Они готовы занять свою нишу в сегменте крупномасштабного хранения энергии, тем самым существенно снизив нагрузку на запасы лития и ускорив переход к более ресурсосберегающей энергетике.

Список литературы:

1. Julien, Ch., Mauger, A., Vijn, A., Zaghbi, K., Lithium Batteries. Science and Technology Switzerland: Springer Int. Publ., 2016, p. 626.
2. Кудряшова Ю. О. Разработка натрий-ионных аккумуляторов как одно из направлений перехода к ресурсосберегающей энергетике // Ретроанализ и генезис подходов к решению проблем физической химии, радиохимии и электрохимии в работе научно. – 2021. – С. 137-160.
3. Ван Е. Ю., Михайлов В. Г., Шевелюхина А. В. Натрий-ионные батареи в качестве альтернативной технологии литий-ионным аккумуляторам в химических источниках тока // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2025. – Т. 169. – №. 3. – С. 182-198.
4. Легонькова К. А. Новые материалы для аккумуляторов: от литий-ионных до твердофазных // Наука, технологии, образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей IV Международной научнопрактической конференции. – 2025. – С. 9-11.