

ПРОТОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**А.В. Шеремет, преподаватель,
Автотранспортный колледж ГВУЗ «Криворожский национальный университет»**

***Аннотация.** В работе проанализирована конструкция проточных аккумуляторов и выполнен обзор современных технологических решений. Показано, что хотя разработки проточных аккумуляторов находятся только на начальной стадии, их применение на электромобилях может устранить ограничения при их эксплуатации.*

***Ключевые слова:** электромобиль, аккумуляторная батарея, электродвигатель, энергоэффективность, энергосберегающие технологии, проточный аккумулятор, потоковый аккумулятор, электротранспорт.*

ПРОТОЧНІ АКУМУЛЯТОРИ: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

**А.В. Шеремет, викладач,
Автотранспортний коледж ДВНЗ «Криворізький національний університет»**

***Анотація.** В роботі проаналізована конструкція проточних акумуляторів та виконаний огляд сучасних технологічних рішень. Показано, що хоча розробки проточних акумуляторів знаходяться тільки на початковій стадії, їх застосування на електромобілях може усунути обмеження при їх експлуатації.*

***Ключові слова:** електромобіль, акумуляторна батарея, електродвигун, енергоефективність, енергозберігаючі технології, проточний акумулятор, потоковий акумулятор, електротранспорт.*

FLOW BATTERIES: MODERN TECHNOLOGIES AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

**A. Sheremet, lecturer
Autotransport College GHEI “Kryvyi Rih national University”**

***Annotation.** This paper analyzes the design of flow batteries, the review of modern designs. It is shown that although the development of flow batteries is still in its initial stage, their application in electric vehicles can eliminate the limitations in their operation.*

***Key words:** electric car, battery, electric motor, energy efficiency, energy-saving technologies, flow battery, electric vehicle, electric transport.*

Введение

В последнее время в связи с ростом цен на топливо и повышением требований к экологичности транспорта все большую популярность начали приобретать электромобили. В значительной степени этому способствует

создание мощных, легких и компактных аккумуляторов.

Производством электромобилей занялись практически все крупнейшие автопроизводители.

Аккумуляторная батарея является главным элементом современного электромобиля. Именно ее параметры определяют конкурентоспособность электромобилей по сравнению с традиционными автомобилями, которые используют двигатели внутреннего сгорания. Существующие батареи, которые используются в современных электрических и гибридных автомобилях (как правило, литий-ионные), имеют несколько существенных недостатков:

- существующие аккумуляторы являются достаточно громоздкими. Это ограничивает их емкость и, как следствие, пробег электромобиля на одной зарядке. Для большинства электромобилей в типичных городских условиях он составляет 80–150 км.

- относительная недолговечность этих батарей (до 1000 циклов заряда-разряда). Правда долговечность можно значительно увеличить, снизив напряжение зарядки, однако это значительно увеличит время заряда. В целом срок службы литиевых батарей составляет около 5 лет, что достаточно мало, особенно учитывая их стоимость.

- длительное время зарядки. В лучшем случае зарядка литиевой аккумуляторной батареи длится 15–30 минут, однако может продолжаться до нескольких часов. Ускорить процесс можно простой заменой аккумуляторной батареи на полностью заряженную, но такое решение потребует создания сети специализированных сервисных центров.

- высокая стоимость аккумуляторов — порядка \$500 за кВт•ч, что составляет до 70% от стоимости самого электромобиля.

Развитие проточных аккумуляторных бата-

рей, конструкция которых принципиально отличается от используемых на сегодняшний день источников энергии, может стать настоящим прорывом в этой области. Именно на данный тип батарей в последнее время ученые делают особую “ставку”.

Анализ публикаций. Технология проточных аккумуляторов корнями уходит в космическую отрасль: впервые источник энергии данного типа был запатентован в 1976 году NASA и был предназначен для обеспечения электроэнергией космических аппаратов. Технология сочетает в себе конструктивные преимущества традиционных аккумуляторных батарей и топливных ячеек.

В проточных аккумуляторах реакции проходят в двух емкостях с электролитами (рис.1). Электролит одного резервуара циркулирует вокруг анода, а другого — вокруг катода. При этом электроды и жидкости разделены специальной полупроницаемой мембраной. Она не допускает перемешивания жидкостей, но не мешает электродам обмениваться ионами. Продукты реакции выводятся из топливной ячейки обратно в резервуары по замкнутому контуру. Отсюда и название такого типа аккумуляторов — проточные или потоковые.

Емкость проточного аккумулятора определяется объемом резервуаров с электролитом, а мощность зависит от площади мембраны и электродов [1,2]. Таким образом, потоковые аккумуляторы способны хранить значительное количество электроэнергии. Чтобы это обеспечить, необходимо просто увеличить емкость резервуаров для электролитов.

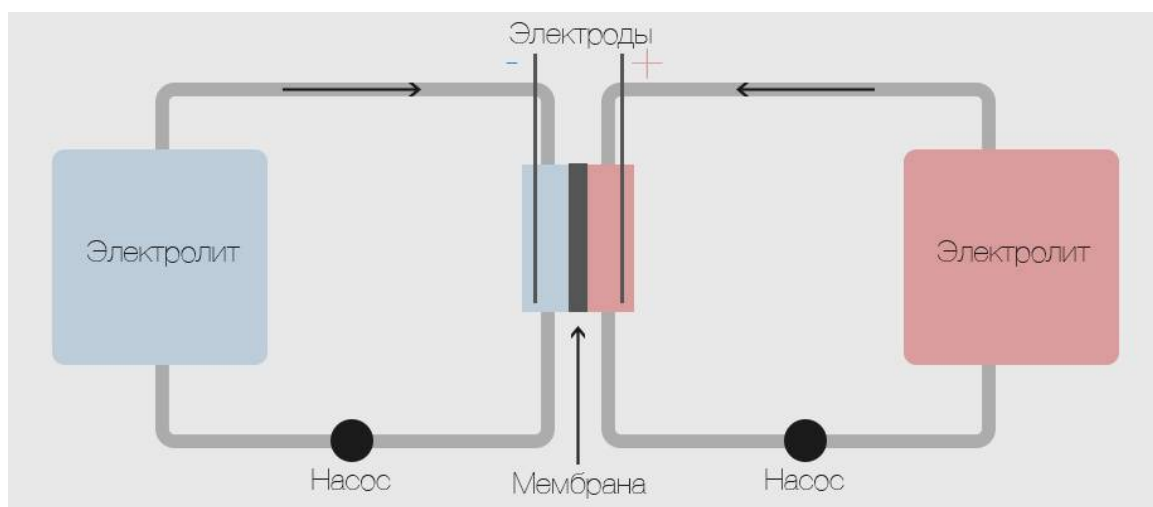


Рис. 1 – Устройство проточного аккумулятора

Цель и постановка задачи

Целью работы является проведение обзора современных конструкций проточных аккумуляторов а также изучение перспектив их применения на автомобильном транспорте.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить обзор существующих конструкций проточных аккумуляторов;
- проанализировать преимущества и недостатки проточных аккумуляторов;
- определить перспективы применения проточных аккумуляторов на электромобилях.

Современные конструкции проточных аккумуляторов

На сегодняшний день самым распространенным типом проточных аккумуляторов считаются ванадиевые батареи (Redox – от английского reduction-oxidation, или VRB). В аккумуляторах данного типа заряд хранится в ионах ванадия, которые содержатся в растворе на водной основе.

Ионы ванадия стабильны и могут проникать через мембрану без нежелательных побочных явлений. Однако удельная энергоёмкость (количество запасаемой энергии на литр электролита) таких аккумуляторов остаётся на достаточно низком уровне [3].

Поэтому до недавнего времени потоковые аккумуляторы были малоприспособны для применения на электромобилях. Даже самая успешная из подобных конструкций имела при необходимой емкости слишком большие размеры. Поэтому дальнейшего ограниченного применения в качестве стационарных аккумуляторов дело так и не пошло. Кроме того, стоимость ванадиевых батарей достаточно высока — даже для самых дешевых аккумуляторов она составляет более \$300 на кВт•ч, в то время как, по оценкам Министерства энергетики США, для широкого распространения цена аккумулятора не должна превышать \$100 за кВт•ч. Но только стоимость ванадия, который используется в системе, составляет около \$80 на кВт•ч [3].

На данный момент ведутся активные поиски способов удешевления проточных аккумуляторов и улучшения их характеристик. Так, Майкл Маршак (Michael Marshak) из

Университета Западного Резерва (Case Western Reserve University, США) совместно с коллегами решил заменить дорогостоящие компоненты проточных аккумуляторов более дешевыми и доступными материалами. Он растворил 2,6-дигидроксиантрахинон и ферроцианид, которые используются в качестве пищевых добавок, в растворах гидроксида калия, и прокачивал эти растворы через проточную ячейку с бумажно-углеродными электродами. Полученный источник электроэнергии выдает напряжение 1,2 В, что является достаточным для того, чтобы вести разговор о его коммерциализации [4].

Группа ученых во главе с Майклом Азизом (Michael J. Aziz) из Гарвардского университета (Harvard University, США) заменила ванадий на хиноны (органические соединения, которые используются животным и растительным миром для переноса электронов и протонов в процессе дыхания). Экспериментальный образец потокового аккумулятора содержит резервуары с водным раствором хинона и жидкого брома. При прохождении через генераторную ячейку молекулы хинона отдают по паре протонов и электронов, а из каждой молекулы брома образуется две молекулы бромистого водорода. Хинон-гидрохиноновая реакция по сравнению с ванадиевой происходит приблизительно в 1000 раз быстрее. На данный момент Азиз работает над заменой достаточно опасного для человека брома на иную разновидность хинона.

Хиноновый аккумулятор получился в десять раз меньше ванадиевого. Стоимость хинона составляет всего \$27 на 1 кВт•ч емкости, поэтому можно ожидать, что при серийном производстве удастся уложиться в вышеупомянутые \$100 за 1 кВт•ч. Агентство перспективных оборонных научно-исследовательских разработок США (DAPRA) уже заказало прототип хинонового аккумулятора [3,5].

Один из вариантов решения проблемы был предложен учеными из технологического института Массачусетса (Massachusetts Institute of Technology, США), которые представляют фирму 24M Technologies. В своих экспериментах ученые использовали специальную суспензию — смесь жидкого электролита с твердыми наночастицами оксида лития-кобальта и углерода. Данную суспензию они назвали «полутвердая проточная

ячейка» (semi-solid flow cell, SSFC). Аккумулятор SSFC, по мнению авторов, взял все лучшее и от потоковых, и от традиционных аккумуляторов.

Эксперименты показали, аккумулятор SSFC работоспособен, а новый электролит обладает достаточной текучестью. Углерод, помимо транспортировки электронов, стабилизирует в суспензии наночастицы соединений лития, не допуская выпадения их в осадок. Стоимость опытных образцов на данном этапе составляет около \$250 за кВт•ч [3,6].

Доктор Цин Ван (Qing Wang) из Национального университета Сингапура (The National University of Singapore) и его коллеги разработали проточный аккумулятор, в резервуарах которого одновременно содержатся твёрдые и жидкие электролиты. Учёные поместили в катодное отделение гранулы фосфата лития-железа, а в анодное отделение добавили диоксид титана. Для транспортировки ионов из пор твёрдого электролита в разделенную мембраной реакционную ячейку, они использовали специальные жидкости переносящие заряд, которые известны как окислительно-восстановительные медиаторы. При этом мембрану учёные дополнили специальным полимером, Это позволяет ей пропускать ионы лития, но задерживать молекулы жидкости-медиатора. С противоположной стороны мембраны ионы подхватываются другими медиаторами и переносятся к молекулам диоксида титана, где оседают в виде лития.

Благодаря применению твёрдых материалов, удельная ёмкость нового аккумулятора составила 500 Вт•ч на один литр электролита, что в десять раз больше, чем у ванадиевых проточных аккумуляторов.

Однако у нового аккумулятора есть существенный недостаток в виде незначительной мощности. Полимер мембраны ограничивает поток ионов, что увеличивает время заряда и разряда аккумулятора. По словам Цин Вана, данная версия потокового аккумулятора прекрасно подходит для стационарного применения, но для использования в электромобилях он должен быть усовершенствован [7].

Группа ученых из Департамента Энергетики США (United States Department of Energy) и Стэнфордского университета (Stanford

University) создали батарею, которая, в отличие от традиционных проточных аккумуляторов, использует камеру только с одним потоком (рис.2). Это позволило отказаться в ее конструкции от мембраны, которая имеет высокую стоимость и требует повышенного внимания и периодического обслуживания. В данном аккумуляторе используется электролит из лития и серы. Он вступает в реакцию с литием барьерного покрытия. Оно препятствует прохождению ионов и разрушению металла. Во время разряда, полисульфиды лития поглощают ионы лития, а при заряде ионы возвращаются в электролит.

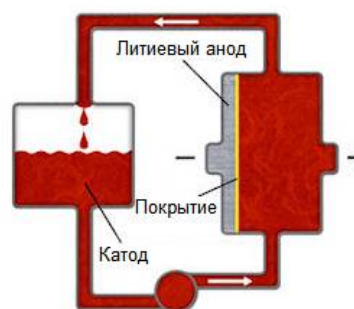


Рис. 2 – Устройство проточного аккумулятора с одним потоком

Тесты доказали работоспособность аккумулятора после 2000 циклов перезарядки [8].

Однако мощность потоковых аккумуляторов все также определяется размерами мембраны и электродов в генераторной ячейке, а также интенсивностью происходящих на них реакций. Очевидным путем повышения мощности топливной ячейки является увеличение площади поверхностей электродов и мембраны.

Но специалисты компании Nanoflowcell (штаб-квартира Кильхберг, Швейцария) пошли по другому пути – объектом их изыска- ний стала сама жидкость. Они разработали инновационную систему носителя заряда Vi - ION, которую внедрили в потоковый аккумулятор. Помимо электроактивных веществ электролит содержит наночастицы, которые способны формировать в непосредственной близости от катода и анода пространственные структуры. В результате этого заряд формируется не только на поверхности электродов, но и в пространстве вокруг них, то есть в самой жидкости. Таким образом, пространство, в котором происходит реакция, оказывается гораздо больше обычного. Результаты исследований показали, что эта

жидкость способна обеспечить плотность энергии в размере 600 Вт•ч на литр. При этом у батареи Nanoflowcell практически полностью отсутствует склонность к саморазряду, а ресурс составляет около 10000 зарядных циклов.

По заявлениям разработчиков, Vi-ION не воспламеняется и не обладает взрывчатыми свойствами. Производство данной жидкости значительно дешевле, чем переработка топлива или изготовление литий-ионных аккумуляторов. Компоненты для Vi-ION не извлекаются в каких-то отдельных странах с богатыми месторождениями полезных ископаемых, как это происходит с нефтью. Электролит может быть изготовлен при наличии соответствующего производственного оборудования практически в любой стране мира. Однако на сегодняшний день его состав строго засекречен.

Компанией были проведены испытания проточных аккумуляторов с электролитом Vi-ION на автомобилях Quant E-Sportlimousine, Quant F и Quantino.

Quant E-Sportlimousine (рис.3) имеет четыре электродвигателя, пиковая мощность которых составляет 925 л.с. (номинальная 653л.с.) и развивают суммарный крутящий момент 2900 Н•м. Автомобиль разгоняется до 100 км/ч за 2,8 с, расчетная максимальная скорость составляет 380 км/ч. Пробег электромобиля на одной зарядке достигает 600 км.



Рис. 3 – Электромобиль Nanoflowcell Quant E-Sportlimousine

Электромобиль Quant F внешне практически не отличается от Quant E-Sportlimousine, но имеет измененную систему тягового электропривода и другие технические характеристики. В отличие от Quant E, на автомобиле Quant F установлен блок суперконденсаторов, который может заряжаться силой тока до 50 А, а на электродвигатели может одновременно подаваться ток силой более

2000 А. Максимальное напряжение в системе тягового электропривода может достигать 735 В вместо 600 В, как у предыдущей модели. Средний показатель напряжения при продолжительной работе — 400 В. Электродвигатели автомобиля имеют мощность 1090 л.с., запас хода достигает 800 км. Максимальная скорость электромобиля ограничена 300 км/ч. Объем резервуаров для электролитов суммарно составляет 500 литров.

Техническая инспекция Германии (TÜV) официально допустила Quant F на дороги. Однако о серийном производстве электромобиля речь пока что не идет.

Наиболее близким к серийному производству является хэтчбек Quantino (рис.4). Особенностью Quantino является низковольтная энергетическая установка, напряжение которой составляет всего 48 В. Четыре двигателя электромобиля развивают мощность по 136л.с., при этом каждый электромотор развивает до 200Н•м крутящего момента. Это позволяет автомобилю массой немного меньше полутора тонн двигаться с максимальной скоростью до 200 км/ч и разгоняться до 100км/ч за 5 с.



Рис. 4 – Электромобиль Nanoflowcell Quantino

В ходе испытаний, которые проходили на автодроме в Цюрихе, Quantino преодолел расстояние в 1000 км за 8 ч 21 мин, при средней скорости в 120 км/ч. После теста главного инженера NanoFlowcell Нунцио Ла Веккья, который проехал 1 036 км со средней скоростью в 74 км/ч, имитируя городской цикл движения, остаток емкости аккумулятора составил 78%.

Электромобиль оборудован проточным аккумулятором с двумя резервуарами по 95л. При этом конструкторам удалось обойтись без тяжелых и дорогостоящих суперконденсаторов.

Насколько известно, конструкция электро-

мобиля Quantino не предусматривает повторного использования электролита, но возможно в серийной версии автомобиля появится возможность его повторной перезарядки.

К сожалению, в компании пока не называют точной даты выхода данных разработок на рынок. Однако о серьезности намерений nanoFlowcell говорит тот факт, что основным партнером является компания Bosch.

По заявкам nanoFlowcell, при промышленном производстве проточных батарей nanoFlowcell, стоимость электролита для них будет составлять менее чем \$0,1 за литр, а значит заправка обоих баков в Quantino будет стоить около \$19 [9-11].

Таким образом, преимущества потоковых аккумуляторов заключаются в том, что вещества, которые хранят электроэнергию, изолированы от устройства, в котором она генерируется. Поэтому неважно, сколько проводящих веществ имеется в аккумуляторе - узел-генератор тока будет только один. Благодаря этому серьезно снижается вес и стоимость проточных аккумуляторов. Кроме того перезаряд данного типа аккумуляторов может производиться не только подачей к нему тока, но и заменой электролитов, что позволяет выполнить перезарядку за несколько минут.

За счет конструкционных особенностей и используемых материалов, потоковые батареи в пересчете на киловатт-часы аккумулярованной энергии намного дешевле литий-ионных аккумуляторов. Изолированные друг от друга активные вещества и один генераторный модуль практически полностью исключают возможности замыкания или перегрева. А так как именно по этим причинам происходит самовоспламенение литий-ионных аккумуляторов, потоковые батареи являются гораздо более безопасными.

Выводы

Анализ существующих конструкций проточных аккумуляторов показал, что работы над ними находятся в начальной стадии, однако уже существуют конструкции весьма близкие к массовому производству. Еще не исследованы вопросы их долговечности. Не разработаны технологии производства и перезарядки. Но если эти проблемы удастся

решить, то, как показывают испытания электромобилей, применение проточных аккумуляторов может привести к настоящей революции на автомобильном электротранспорте.

Литература

1. Проточные аккумуляторы: принцип работы, отличия, тесты, схема // Материалы сайта – 2017. – Режим доступа: <https://akkumulyatoravto.ru/vybor-akb/vidy/protochnye-akb.html>.
2. Как устроен проточный аккумулятор - подробно // Материалы сайта – 2016. – Режим доступа: <https://best-energy.com.ua/support/battery/be-210-b>.
3. Новые перспективы аккумуляторов // Материалы сайта – 2015. – Режим доступа: <https://technowars.defence.ru/article/2474/>
4. Щелочной аккумулятор для возобновляемых источников энергии // Материалы сайта – 2015. – Режим доступа: <http://altenergiya.ru/accumulator/shhelochnoj-akkumulyator-dlya-vie.html>
5. Хиноновый проточный аккумулятор: проблемы и перспективы // Материалы сайта – 2014. – Режим доступа: <http://mirnt.ru/energia/hinonovyj-protchnyj-akkumuliator-problemy-i-perspektivy>
6. Испытан прототип сверхъемкой полужидкой батареи // Материалы сайта – 2011. – Режим доступа: <http://www.membrana.ru/particle/16202>
7. Vesti.Ru: Создана проточная батарея высокой емкости // Материалы сайта – 2015. – Режим доступа: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=2692810>.
8. Создана потоковая батарея нового типа // Материалы сайта – 2013. – Режим доступа: <http://supreme2.ru/3284-potokovaya-batareya/>
9. Автомобили на жидком электричестве // Материалы сайта – 2016. – Режим доступа: <https://www.drive2.ru/b/2849445/>.
10. nanoFlowcell: автомобиль, который «убьет» нефть // Материалы сайта – 2016. – Режим доступа: <https://www.popmech.ru/vehicles/164603-nanoflowcell-izobrela-ekologicheski-chistuyu-neft/>
11. www.nanoflowcell.com/ // Материалы сайта – 2017. – Режим доступа: <http://www.nanoflowcell.com/>

Рецензент: А.С. Паникарский, к.т.н., доцент ХНАДУ.