

Хитроумната наука в алуминиево-въздушната батерия¹

Ст. Частийн, Н. Частийн, П. Дохърти

Батериите с плодове и със солена вода предоставят прекрасна възможност за изследване на прости вериги в клас. Те са примери за въздушни батерии, в които метал реагира с кислорода от въздуха и освобождава електрони, които протичат през външната верига и извършват работа. На учениците обикновено се казва, че солената вода или плодовият сок действат като електролити, за да пренесат електроните от анода до катода. Това е вярно, но ако се ограничим само дотук, за съзнанието на ученика батерията остава една черна кутия. Учителите по физика често нямат достатъчна подготовка, за да обяснят химията, която е скрита в тези батерии. Ние написахме тази статия, за да обясним електрохимията в една въздушна батерия, която използва меден катод, алуминиев анод и солена разтвор.

Дейностите, включващи батерии, са полезни отчасти и заради това, че учениците обикновено разбират добре какво означава *пад* на напрежението в една верига (при последователно свързване на резистори), но нямат много възможности да научат от опит за *увеличаване* на напрежението при последователно свързване на източници. Описаната по-долу дейност може да се използва също при обсъждане на алтернативни източници на енергия, както и за осигуряване рамка за обсъждане на горивните елементи.

Материали и конструкция

За подробности по конструкцията може да се посети сайта <http://www.exo.net/~pauld/saltwater>. Ще имате нужда от:

1. мед (частично оголен многожилен меден кабел или медна тръбичка от железарски магазин), дълга 10 см
2. алуминиево фолио с размери 10x10 см
3. готварска сол, вода и съдове
4. пет крокодилчета
5. светодиод или 12-волтов зумер за прав ток

Разтворете около 20 г сол в 400 мл топла вода. Количествата не са толкова съществени, но по този начин ще получите солена разтвор с около 5 % тегловна концентрация. Прегънете алуминиевото фолио на две и след това още на две по дължина, за да получите дълга ивица. Оголете изолацията в двата края на медната жица, като в средата я оставите, за да държи нишките заедно. В единия край на жицата разделете нишките така, че да се образува нещо като метличка.

С помощта на крокодилче защитете алуминиевото фолио в единия край на съда. Защипете медната жица в другия край на съда така, че “метлата” да бъде вътре в съда. Това представлява един “елемент” на вашата батерия. Можете да свържете повече такива елементи последователно, като с крокодилче свържете медния електрод на един съд с алуминиевия електрод на следващия.

Свържете крайните два извода с мултиметър, светодиод или пиезоелектричен зумер. Какво става?

Да направим и отчетем

Мултиметърът ще отчете ток, а светодиодът ще свети мъждиво. Ако не свети, опитайте да го свържете обратно към изводите на източника – той е диод и пропуска ток само в една посока! В една изпълнена с ученици и добре осветена класна стая най-

¹ Съкратен превод от декемврийския брой на The Phys. Teacher за 2008 г. Предлагаме на читателите материала като средство за осъществяване на междупредметна връзка в обучението по физика и химия на основа на една интересна учебно-изследователска дейност. (Бел. прев.)

впечатляващ резултат осигурява зумерът, който ще забръмчи щом запълните с разтвор и последния съд. Учениците може да изследват как се променя яркостта на светодиода и токът когато добавят или махат съд или допират електродите един до друг. Как се променя токът, когато във веригата се добави нов светодиод? Те могат също така да измерят напрежението и тока, получени от един елемент и във веригата като цяло, за да изследват правилата на Кирхоф и да пресметнат мощността на тока във веригата.

Какво става всъщност?

Всеки съд представлява електрохимичен елемент с напрежение около 0,5 V и ток около 1 mA. Когато елементите се свържат последователно, те действат подобно на волтова батерия: техните електродвижещи напрежения се събират, така че четири последователно свързани елемента осигуряват напрежение около 2 V. Светодиодите започват да излъчват (или зумерът бръмчи) само, когато се достигне тяхното прагово напрежение (около 1–2 V). Затова минималният брой елементи е около четири. Допирът между медния и алуминиевия електрод в един съд дава елемента накъсо и светодиодът няма да свети.

Когато във веригата се включи и зумер, токът през елементите намалява, защото общото съпротивление нараства. Това намаляване на тока може да се използва за пресмятане на съпротивлението на самата верига, без светодиода. Така се стига до обсъждане на реалните батерии и на вътрешното съпротивление.

Имайте предвид, че за да мерите тока и напрежението на един резистор, трябва да разполагате с два мултиметъра, защото двете измервания трябва да се правят едновременно.

Проучване на електрохимията

В добавка към физиката на електричните вериги, учениците лесно ще открият, че има твърде много, което следва да се проучи около електрохимията на елемента.

- Забелязвате ли нещо да става на електродите?
- Какво става ако разбъркаме разтвора или добавим сол?
- Какво става с тока, ако добавим малко белина?
- Какво става, ако добавим оцет, сода бикарбонат или плодов сок?
- Какво забелязваме, ако оставим веригата затворена през нощта или няколко дни?
- Какво наблюдаваме, ако и двата електрода са алуминиеви?

Как работи елементът?

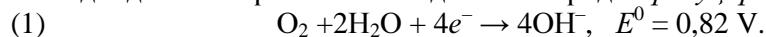
Стандартният отговор в стил “черна кутия” е, че медта е по-електроотрицателна и печели схватката за привличане на електроните. Това обяснение обаче пренебрегва важната роля на разтворения кислород, на O_2 . Във външната верига потокът на електроните е в посоката алуминий \rightarrow светодиод \rightarrow мед \rightarrow разтворен кислород (противоположно на условната посока на тока). Вътре в разтвора обаче носените от йоните електрони трябва да се движат от медта (катода) към алуминия (анода), за да се затвори веригата и се възстанови запасът от електрони, напуснали алуминия (фиг. 1). Как протича този процес и каква е ролята на солта? По-долу обясняваме това.

Добре е да отбележим, че посредством серия химични реакции електроните увеличават потенциалната си енергия по пътя от медния към алуминиевия електрод в разтвора. Това им позволява да извършват работа във външната верига, благодарение на която диодът свети.

Като електроди могат да служат всеки два различни метала. Често се използва въглен и на страницата <http://www.exo.net/~pauld/activities/AlAirBattery/alairbattery.html>

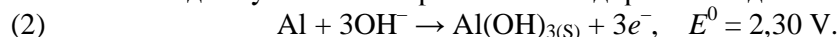
е описано устройството на мощна алуминиево-въглеродна батерия. Солта служи за проводник, пренасяйки заряда през разтвора. Като проводник могат да служат и други вещества – например оцет, плодов сок, саламура или човешкото тяло², въпреки че изобщо колкото по-голяма е проводимостта, толкова по-силен ток може да протече.

Вътре в описания елемент медта служи като източник на електрони (катод). Тя просто пропуска електроните от външната верига, които току що са напуснали светодиода. Разтвореният във водата кислород се *редуцира*³ от тези електрони:



При това около електрода се образуват хидроксилни аниони (OH⁻). Ще забележите, че с течение на времето токът намалява. Това се дължи на факта, че една тясна област около медта обеднява на кислород; разбъркването на разтвора може да помогне за възстановяване на елемента, тъй като доставя нов кислород в тази област. За по-дълги периоди от време токът намалява, защото металите се покриват с оксиди и други странични продукти. Напрежението обаче остава постоянно, тъй като по начало се определя от електроотрицателността на металите, която не се променя.

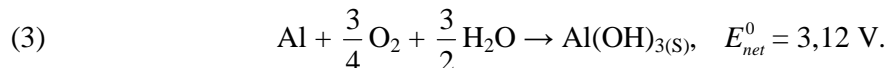
На анода алуминиевото фолио се оксидира – то отдава електрони:



При тази реакция от алуминия и хидроксилните аниони се получава алуминиев хидроксид, Al(OH)_{3(s)}, бяла утайка от Al³⁺. По същия начин кутиите за бира и алуминиевите лодки се разяждат от солената морска вода и се получава Al³⁺. Ако алуминиевото фолио се остави в елемента през нощта, то изтънява (тъй като се оксидира) и се покрива с бял алуминиев хидроксид.

Хидроксилните аниони в реакцията (2) не са тези, получени в реакцията (1) – и тук е мястото, в която се проявява ролята на солта. Натриевите йони (Na⁺) трябва да се придвижат наляво, за да неутрализират йоните OH⁻, получени на медния електрод (фиг.1). По подобен начин хлорните йони (Cl⁻) се придвижват надясно, за да заместят използваните при реакцията (2) OH⁻ йони (OH⁻ идват от вече съществуващите във водата йони OH⁻). Крайният резултат е електрони, пътуващи надясно от медта към алуминия – това е единствената роля на солта! Ако това не стане, реакцията ще протече само кратковременно и ще завърши безславно, щом върху електродите се натрупат заряди.

Стехиометричното комбиниране на реакциите (1) и (2) дава следното равенство за реакциите в елемента:



Реакцията сумира основните химични процеси в елемента при неутрално рН 7.

Забележете, че медта фактически не участва в химичните процеси – електроните просто преминават през нея, позволявайки на кислорода да се редуцира.

Мнозина от учениците питат защо вътре в разтвора електроните се движат от медта към алуминия, въпреки че медта е по-електроотрицателна. Защо реакцията не протича в обратна посока? Вместо това лесно може да се запише поредица от полу-реакции за оксидирането на медта – фактически, когато медта се остави на въздух, тя почервява поради образуването на двумеден оксид (Cu₂O). Следователно медта лесно се оксидира. Когато обаче медта е част от батерия, оксидирането на алуминия от кислорода е енергетично по-изгодно ($E_{\text{net}}^0 = 3,12 \text{ V}$), отколкото оксидирането на медта до Cu₂O ($E_{\text{net}}^0 = 1,18 \text{ V}$) или до Cu²⁺ ($E_{\text{net}}^0 = 0,48 \text{ V}$). Ето защо протича оксидирането на

² Вж. http://www.Exploratorium.edu/snacks/hand_battery.html.

³ Оксидирането представлява загуба на електрони на анода, а редуцирането е получаване на електрони на катода.

алуминия, а не на медта. Част от медта също може да се оксидира – върху медния електрод може да забележите червени (Cu_2O) и черни (CuO) отлагания.

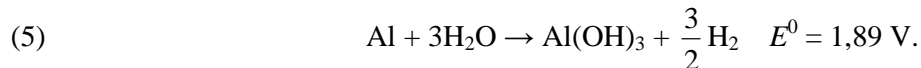
Да отидем по-нататък...

Мехурчетата

По време на работа на батерията може да забележите малки мехурчета върху алуминиевия електрод. Това е водород. Той се получава при допълнителна корозионна реакция, при която алуминият се изразходва, но тя не дава принос към тока:



Така в допълнение към реакцията (3) може да се запише още една корозионна, но непродуктивна реакция на алуминия:



Добавяйки сол

Токът не зависи забележимо от концентрацията на солта, въпреки че повишава проводимостта на разтвора за по-наситени разтвори. Проводимостта на солен разтвор е максимална при концентрация 12 тег. %. Ние използваме разтвори с концентрация 2–5 тег. %, но даже и незначително количество сол върши работа. Опитайте дори и с чешмяна вода – батерията ще работи, но токът ще е слаб. Увеличаването на количеството на солта увеличава проводимостта, но скоростта на реакцията е ограничена от количеството на кислорода в разтвора.

Добавяне на оцет

Един елемент, направен изцяло с разтвор на оцетна киселина, също ще работи, тъй като H^+ и отрицателните ацетатни йони, получени при дисоциацията на слабата киселина правят разтвора проводящ. Впръскването на оцет във вашия елемент със солен разтвор ще накара светодиода да свети по-ярко. Не се заблуждавайте обаче – същият ефект ще получите и просто чрез разбъркване на разтвора. След утаяването, действието на кисело-соления елемент, най-общо казано, е сравнимо с това на елемента, който съдържа само солен разтвор.

Вие обаче вероятно ще забележите, че кисело-солени елементи поддържат тока по-продължително време, отколкото елементите със само солен разтвор. Ако оставите през нощта кисело-соления елемент, повърхността на медта няма да бъде покрита с червеникав оксид, а ще бъде блестяща и чиста. Ацетатът в оцета има свойството да разтваря покритието от меден оксид при образуването му, като образува комплекс с Cu(I) . Това осигурява по-дълго време по-добър контакт с разтвора и по-лесно преминаване на електроните.

Подробности за ролята на оцета в елемента може да се намерят на адрес <http://www.exo.net/~pauld/saltwater>.

Добавяне на белина

Може да установите, че ще получите много по-стабилен и по-мощен източник, ако добавите към разтвора (или към обикновена вода) чаена лъжичка белина. Ако във веригата има само мултиметър, токът и напрежението могат да достигнат съответно 10 mA и 1 V, т.е. около 20 пъти по-голяма мощност. Защо се получава това?

Когато се добави белина, батерията престава да бъде въздушна батерия. Вместо кислород от въздуха, в нея протича редукция на натриев хипохлорит (NaOCl) – основната съставка на белината, и на хипохлорната киселина (HOCl), нейната по-малка съставна част. Напрежението на такъв елемент (3,93 V) е малко по-високо от това на

елемента със солена вода (3,12 V). Тази реакция протича по-бързо, освобождавайки повече електрони за единица време и следователно – по-голям ток. Наблюдаваме също така по-високо напрежение. Друг показател за по-бързото протичане на реакцията в батерията с белина са множеството бели пухкави частици, появяващи се с течение на времето – това е $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$.

Допълнителни сведения за ролята на белината в елемента може да се намерят на адрес <http://www.exo.net/~pauld/saltwater>.

В заключение ще отбележим, че въздушната алуминиево-соленоводна батерия предоставя богати възможности за комбиниране на елементи от химията и физиката. Разбирането на химията, която лежи зад действието на батерията, може да помогне на учителя по физика да отговори на въпросите на учениците.