

О ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ВОДЫ

Берзан В.П., Анисимов В.К.
Институт Энергетики Академии наук Молдовы
ул. Академическая ,5, МД 2028, Кишинэу
Республика Молдова
Тел.(0 373 22) 73.53.84, e-mail: berzan@cc.acad.md

Аннотация

Исследованы физические процессы при электролизе воды с энергетической точки зрения при малых плотностях тока.

Получение водорода возможно не только при общеизвестном расходе электроэнергии превышающем энергию которую можно получить при сжигании этого водорода (около 12 МДж/м³), но при некоторых условиях и при меньшем расходе электроэнергии. Определена минимальная плотность тока (10 А/м²) при которой восстановление ионов газов происходит энергоэкономичным способом, а также значение плотности тока (10⁷А/м²) при которой в растворе электролита начинаются плазменные разряды.

Экспериментально показано, что если условие обеспечения минимальной плотности тока выполняется только на одном электроде, то и выделение газа происходит именно на нем в виде кратковременного переходного процесса. Вид этого газа (водород или кислород) определяется полярностью питания электролитической ячейки.

Экспериментально определены значения напряжения, при которых не выделяется газ на электродах, выделяется на одном электроде и газ начинает выделяться на обоих электродах ячейки.

Выявлены также процессы, существование которых можно объяснить только прохождением электронов через электролит.

Ключевые слова: электролиз воды при малых плотностях тока.

DESPRE PROCESELE FIZICO-CHIMICE LA DISOCIEREA ELECTROLITICĂ A APEI

Rezumat

S-au studiat procesele fizice la descompunerea apei din punct de vedere energetic în regimuri de scurgere a curenților mici. Obținerea hidrogenului este posibilă nu numai prin procedee cu consumul de energie care depășește energie de ardere a hidrogenului (cca 12 MJ/m³), dar în unele cazuri și la consumuri mai mici de energie electrică.

S-a determinat valoarea minimală a densității curentului (10 А/м²) la care reducerea ionilor a gazului are loc cu consum redus de energie elctrică, precum și densitatea curentului (10⁷ А/м²) care asigură apariția descărcărilor de plasmă în volumul electrolitului.

Experimental s-a confirmat faptul, că dacă condiție privind valoarea minimală a densității curentului este valabilă numai pentru un electrod, în acest caz are loc eliminarea gazului numai pe acest electrod în formă de proces tranzitoriu de scurtă durată. Genul gazului (hidrogen sau oxigen) este determinat de polaritatea tensiunii aplicate la celula electrolitică.

Experimental s-au determinat valorile tensiunilor la care nu are loc fenomenul de generare a gazului în zona electrozilor, se generează numai de un singur electrod și de ambii electrozi.

S-au depistat procese, existența cărora se poate lămuri numai prin scurgerea electronilor prin electrolit.

Cuvinte cheie: disocierea electrolitică a apei.

ABOUT PHYSICOCHEMICAL PROCESSES AT ELECTROLYTIC DECOMPOZITION OF THE WATER

Abstract

Physical processes are investigated at electrolyze waters from the power point of view at small density of a current.

Reception of hydrogen is possible not only at the well-known charge of the electric power exceeding energy which can be received at burning this hydrogen (about 12 MJ/m³), but under some conditions and at the smaller charge of the electric power. The minimal density of a current (10 А/м²) is determined at which restoration of ions of gases occurs in the energy-economic way, and also value of density of a current (10⁷А/м²) at which in a solution of electrolyte begin plasma discharges.

It is experimentally shown, that if the condition of maintenance of the minimal density of a current is carried out only on one electrode also liberation of gas occurs on it as short-term transient. The kind of this gas (hydrogen or oxygen) is determined by polarity of a supplay of electrolitical cell.

Values of a voltage at which gas on electrodes is not receipt are experimentally determined, is receipt on one electrode and gas starts will be receipt on both electrodes of a cell.

Processes which existence it is possible to explain only passage electrons through electrolyte are revealed also.

Key words: electrolysis of water.

1. Введение.

Процесс разложения воды на водород и кислород считается хорошо изученным и давно применяется на практике [1 – 3]. Большое распространение получили щелочные электролизеры [3], работающие при напряжении 2,2 – 2,4 В. Процесс электролиза в основном стараются усовершенствовать в сторону увеличения к.п.д. процесса и/или установки [4]. Следует отметить, что исследования процессов разложения воды имеют длительную историю и в настоящее время установлены ряд фундаментальных характеристик механизма функционирования электролизеров, а также инженерных методик расчета этих устройств: минимальное напряжение для разложения воды (1,23В) [3], реакции на электродах [1], составляющие напряжения на электролитической ячейке [3], и многое другое. Анализ этой информации и ее сопоставление с экспериментальными результатами, полученными на общеизвестной щелочной электролитической ячейке, показывает, что имеются еще ряд неясных вопросов о функционировании электролизеров. В частности, как соблюдается энергетический баланс при разложении молекулы воды, как формируются молекулы газов – водорода и кислорода, и другие. Например, сравнение энергий выделяемой реакцией соединения водорода и кислорода в 286 кДж/моль с одной стороны, и потребляемой ячейкой при разложении воды (по закону Фарадея – 96500 К на грамм – эквивалент, или 193000 К для молекулы водорода) $1,23 \times 193000 = 237,4$ кДж с другой стороны, показывает, что напряжение 1,23 В недостаточно для разложения воды по энергетическим соображениям.

В данной работе предпринята попытка исследования особенностей физических процессов при электролизе с малыми плотностями тока с энергетической точки зрения, так как возникшие вопросы относятся прежде всего к энергетике процесса.

2. Методика исследований

Экспериментальные исследования проводились в основном на электролитической ячейке в виде емкости из электроизоляционного материала с 20% раствором NaOH и объемом около 500 см³ со стальными электродами. В процессе экспериментов использовались электроды с разной площадью рабочей поверхности и разной формой. Схема электропитания ячейки обеспечивала возможность плавного изменения напряжения в больших пределах. Ячейка является нелинейным элементом, очень чувствительным к изменениям значения приложенного напряжения. Поэтому питание ячейки осуществлялось через постоянный резистор, который обеспечивал перераспределение приложенного напряжения между ячейкой и балластным резистором в зависимости от текущего значения электропроводности ячейки. Значение резистора выбрано таким, чтобы при уменьшении тока через ячейку во времени напряжение на ячейке увеличивалось. Это позволило уменьшить время определения граничных состояний режимов работы ячейки: без выделения газа на электродах, с выделением газа на одном электроде и на обоих электродах. На электролитическую ячейку прикладывали ступенями напряжение постоянного тока и для этих значений измеряли переходные характеристики процесса.

Особенности прохождения через ячейку тока исследовались при разной его плотности. С целью визуализации потока движущихся ионов в растворе использовалась электролитическая ячейка со светонепроницаемыми стенками и дном. Визуализация обеспечивалась явлением захвата пузырьков газа движущимся потоком ионов в окрашенном электролите. Проявление феномена визуализации процесса движения некоторых ионов зависит от глубины погружения электродов, расстояния между ними,

напряжения питания (тока через ячейку), температуры, вязкости раствора, вида электродов.

Локальное повышение тока в растворе обеспечивалось за счет сужения канала проводимости тока через объем жидкости – отверстием в электроизоляционной перегородки расположенной между электродами.

Напряжение и ток измерялись соответствующими приборами. Измерения проводились при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении.

3. Результаты экспериментальных исследований

Известно, что для начала выделения газов требуется определенная величина напряжения на ячейке. Возможно, по этой причине процессы в электролитических ячейках при напряжениях ниже напряжения начала выделения газов практически не рассматривались и не изучались прежде. Поэтому в данной работе основное внимание уделено экспериментальным исследованиям процессов при малых уровнях напряжения. Известно, что даже при этих напряжениях через ячейку также протекает остаточный ток [3]. Электролитическая ячейка содержала 20% раствор NaOH и стальные электроды. При этом измерялись токовые характеристики переходных процессов при приложении ступеньки напряжения. Результаты измерений приведены на рис. 1-3.

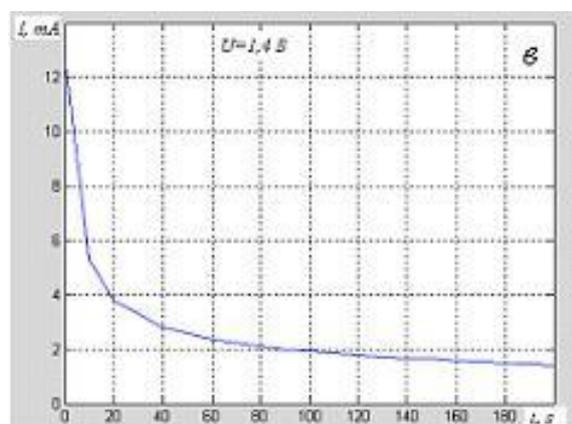
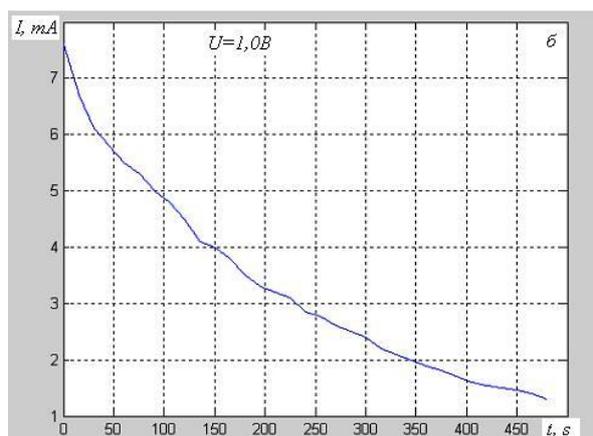
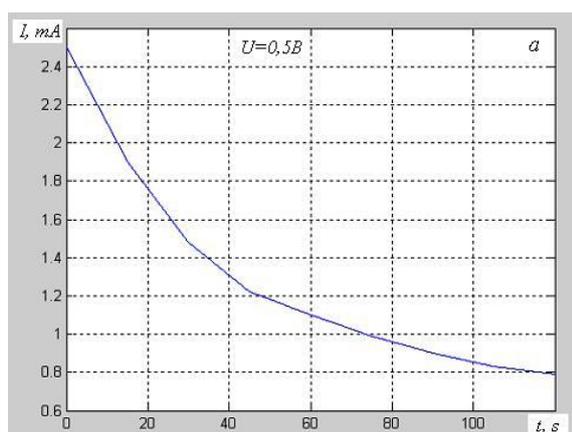


Рис. 1. Переходные токовые характеристики при приложении ступеньки напряжения 0,5В (а), 1,0 В (б) и 1,4 В (в)

Из рис. 1 видно, что ток ячейки уменьшается во времени, но длительность процесса зависит от приложенного напряжения. При дальнейшем повышении напряжения изменяется характер процессов в ячейке. Кривые изменения тока похожи на характеристики зарядного тока конденсатора, которые включает и составляющую сквозной проводимости через его диэлектрик.

Наличие небольших скачков тока, возможно, объясняется процессами теплового движения молекул и ионов в растворе, разрушающими структуру расположения ионов в приэлектродном слое.

Аналогичные характеристики были получены и для раствора серной кислоты.

При дальнейшем повышении напряжения изменяется характер процессов в щелочной ячейке. С напряжения 1,5 В на аноде появляются пузырьки газа- кислорода. Уменьшение тока во времени сохраняется. Увеличение внутреннего сопротивления ячейки приводит к пропорциональному росту напряжения на ней. После увеличения напряжения до 1,85 В начинается выделение второго газа- водорода, причем отмечено временное уменьшение тока после момента повышения напряжения. Это уменьшение тока происходит до момента появления пузырьков газа на катоде. Соответствующие характеристики приведены на рис.2 (совмещенные зависимости), а на рис. 3 эти же характеристики показаны раздельно.

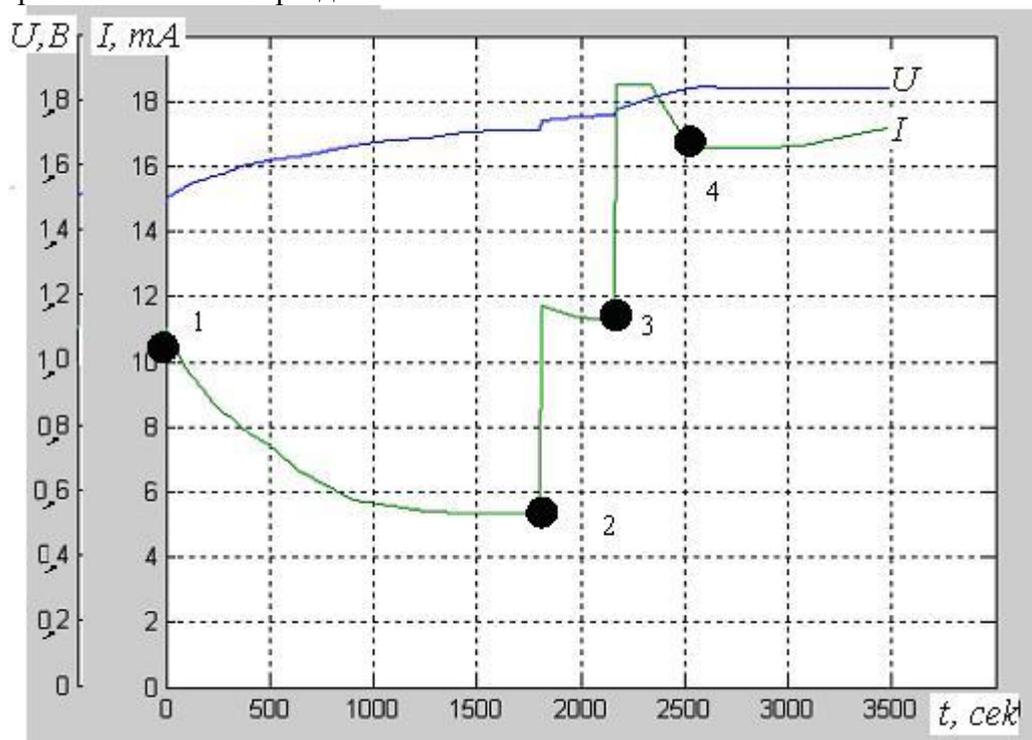


Рис.2. Совмещенные характеристики напряжения $U=f(t)$ и $I=f(t)$ при приложении ступенек напряжения на ячейку, где 1 – момент начала выхода кислорода; 2 - первое дополнительное увеличение напряжения питания; 3 – второе дополнительное увеличение напряжения питания; 4 – момент начала выхода водорода

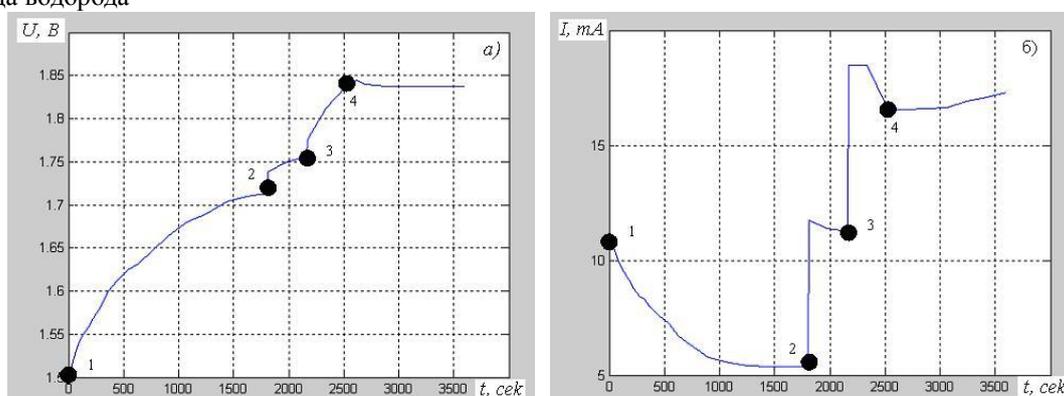


Рис.3. Изменение напряжения на ячейке(а) и тока (б) ячейки при ступенчатом регулировании значения напряжения источника питания.

Процессы в растворе серной кислоты отличаются в основном тем, что первым начинает выделяться водород на катоде.

Электролиз обычно проводят электродами с практически равными площадями рабочей поверхности. Поэтому были проведены эксперименты, при которых эти площади значительно отличались. Обнаружено, что при этом наблюдается временное выделение только одного газа с электрода меньшей площади. На рис.4 приведены фотографии выхода одного газа при электролизе в щелочной ячейки для случая, когда электроды ячейки имеют разную площадь рабочей поверхности.

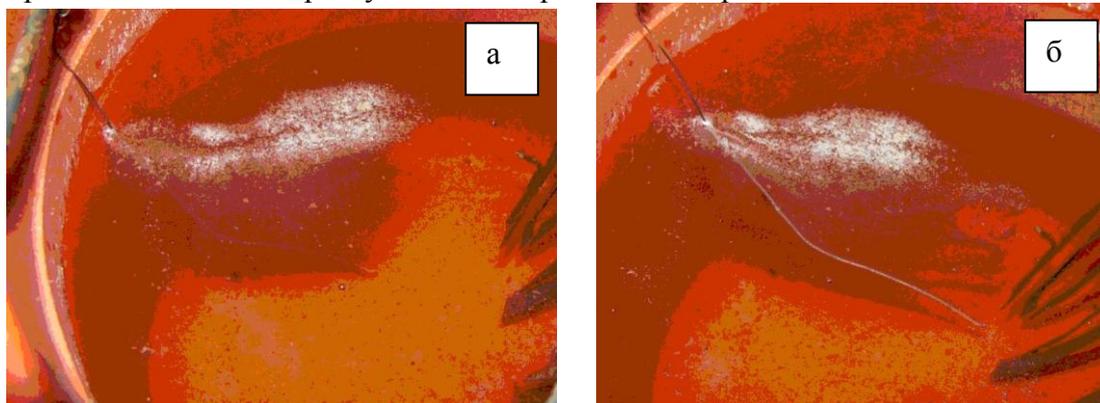


Рис.4. Выход одного газа – кислорода (а) и водорода (б)

Электролиты относят к проводникам второго рода. Следует ожидать, что в силу более сложного состава движение зарядов в этой среде отличается от движения зарядов в проводниках первого рода. Считается, что через электролит имеет место одновременное движение ионов противоположенного знака. Априори считается, что движение ионов происходит по всему сечению электролита (межэлектродного пространства). С целью проверки этого факта при малых токах через ячейку были проведены эксперименты по визуализации этого процесса. В качестве окрашенного электролита было использовано красное сухое вино. Результаты эксперимента по визуализации процесса перемещения ионов через ячейку приведены на рис 5.

При электролизе часть ионов захватывает пузырьки газа и переносят их к противоположенному электроду. Режим электролиза был выбран таким, чтобы обеспечить преимущественное выделение газа на одном электроде. На рис. 5 приведены фотографии развития этого процесса во времени: (а) – начало формирования потока ионов, (б) и (в) - продвижение поток ионов захвативших пузырьки газа, и (г) – огибание потоком ионов захвативших пузырьки газа объемного заряда у противоположного электрода.

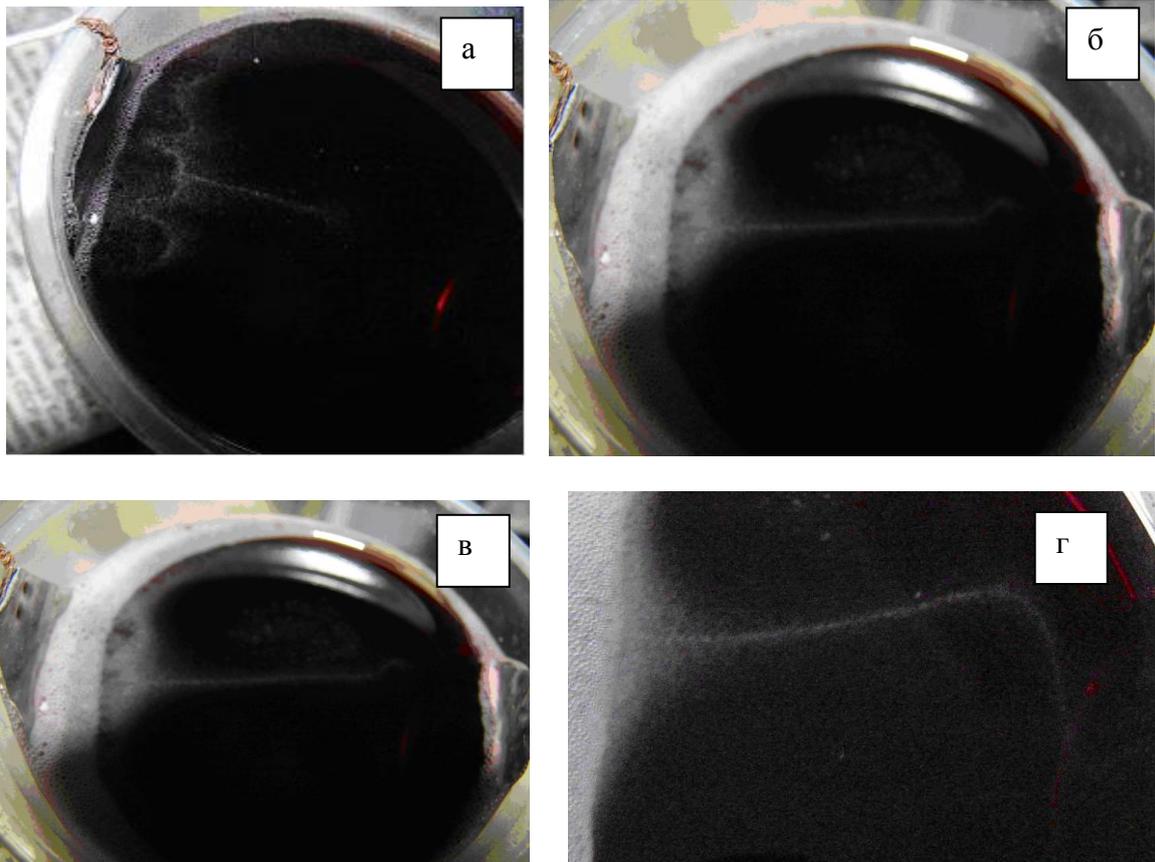


Рис.5. Движения ионов через раствор : (а) – начало формирования потока ионов, (б) и (в) – увеличение длины потока, и (г) – огибание объемного заряда у второго электрода.

4. Анализ полученных результатов и некоторые дополнительные эксперименты

В результате этих экспериментов установлено, что при напряжениях меньше 1,4 В ток через ячейку при снятии ВАХ соответствует амплитудам токов переходных процессов. Последние связаны с накоплением ионов в приэлектродном слое, так как потенциал электродов недостаточен для разряда ионов. При приближении иона к электроду поле иона должно притягивать к себе ионы электрода. Если механическая прочность материала электрода недостаточна, то начнется процесс его разрушения. Практически это наблюдается в щелочных растворах при аноде из меди, а также в растворах солей активных кислот щелочных металлов (например, NaCl) и стальном аноде. При таком подходе ведения процесса электролиза требуется напряжение в несколько раз меньше: вырванные ионы железа из электрода затем разрывают молекулу воды с освобождением водорода. Измерение энергозатрат показало, что на этот процесс для получения 1 м³ водорода надо израсходовать около 6 МДж энергии, что вдвое меньше энергии, которое можно получить при сжигании полученного водорода. Следует отметить, что в средах, содержащих щелочь, этот процесс быстро прекращается: подвижные ионы ОН окружают анод (потенциал которого недостаточен для их разряда) и не дают подойти к нему химически более активным, но менее подвижным ионам кислотных остатков.

На основе закона сохранения энергии было оценено минимальное напряжение, необходимое для разложения воды. На основе закона Фарадея следует, что для получения одного моля водорода с молекулами H_2 необходимо пропустить через раствор $Q=193000$ кулонов (К) электричества. Энергия, которую можно получить, соединив этот водород с кислородом в исходную воду, составляет $W=286$ кДж. По энергетическому балансу минимальное напряжение разложения воды определяется из соотношения

$$U_{\min} = W/Q = 286 \cdot 10^3 / 193 \cdot 10^3 = 1,48 \text{ В}.$$

Отметим, что в растворе щелочи нет отдельных ионов водорода и кислорода, для которых была получена величина 1,23 В, а есть ионы H_3O^+ и OH^- [3].

В процессе борьбы за высокий к.п.д. электролиза воды специалисты стали использовать весьма дорогостоящие материалы, а также увеличивали давление и рабочую температуру электролита, и довели ее до 900°C [4]. Однако для многих случаев практического использования повышенные температуры неудобно. Кроме того это требует дополнительной энергии для поддержания этих температурных режимов в рабочей зоне электролизеров.

При выполнении данной работы удалось за счет применения дешевых стальных электродов специальной формы получить разложение воды при комнатной температуре и атмосферном давлении при напряжении 1,85 В, что соответствует к.п.д. процесса равного 80%.

Экспериментально выявлено, что при электролизе выделение первым кислорода на аноде логически соответствует щелочной среде, в которой практически нет ионов водорода, и ионы водорода образуются после распада на аноде ионов OH^- . Отметим, что этот результат не совпадает с предположением о процессах в щелочных средах, приведенном в [1]:



так как в этом случае первым должен был бы наблюдаться выход водорода на катоде. Кроме того, непонятно, какую роль при этом играют молекулы щелочи. В чистой воде процесс ее разложения идет только при большом напряжении питания. То же самое относится и к кислотным средам, в которых первым начинает выделяться водород на катоде. Получается, что именно участие молекул щелочи и кислоты позволяют производить разложение воды с наименьшим энергопотреблением. Следует отметить, что в щелочных средах по мере расходования ионов OH^- , возможны как вышеуказанная реакция, так и восстановление ионов щелочного металла. Образовавшиеся атомы щелочного металла тут же реагируют с ближайшей молекулой воды с освобождением водорода и образованием новых ионов OH^- .

Как следствие вышеизложенного, для малых плотностей тока предлагаются следующие варианты протекания процессов в щелочных и кислотных средах. По энергетическим соображениям наиболее вероятными представляются следующая последовательность процессов. В щелочных средах сначала на аноде начинают восстанавливаться ионы OH^- :



где e^- - электрон.

По мере их расходования в приэлектродном пространстве катода появляется избыток положительных ионов: щелочного металла и ионов H_3O^+ . Электрическое поле между этими положительными ионами и катодом разрывает прилегающую к нему дипольную молекулу воды по варианту наименьшего энергопотребления:



где p - протон.

Протоны р получают электроны с поверхности катода и образуют водород. Ионы ОН соединяются с ионами щелочного металла в электрически нейтральные молекулы щелочи. Поднимающиеся вдоль поверхности электрода пузырьки водорода создают движение жидкости, которое начинает уносить молекулы щелочи из приэлектродного пространства. Далее эти молекулы распадаются на ионы щелочного металла и ионы ОН. Ионы щелочного металла возвращаются к катоду, а вторые, ионы ОН двигаются через раствор к аноду.

В кислотных средах имеем следующие процессы. Сначала на катоде восстанавливаются ионы H_3O^+ :



По мере их расходования в приэлектродном пространстве анода накапливаются ионы кислотных остатков. Электрическое поле между ними и анодом разрывает молекулу воды в соответствии с формулой (3) и ионы ОН восстанавливаются на аноде :



Протоны, образовавшиеся по реакциям (3) и (5) соединяются с кислотными остатками в нейтральные молекулы кислоты, которые начинают уноситься потоком жидкости, и далее распадаются на ионы с образованием (совместно с молекулами воды) ионов H_3O^+ , которые направляются к катоду. Ионы кислотных остатков возвращаются к аноду.

Получается, что в щелочной среде через раствор движутся ионы разных знаков (H^- и H_3O^+), а в кислотной - ионы только одного знака, причем самые подвижные – H_3O^+ . Поэтому согласно протолитической теории [1] у кислот максимальная проводимость должна быть больше, чем у щелочей. Экспериментальная проверка, которая подтвердила этот вывод, проводилась при одинаковых объемах растворов щелочи и кислоты, в одинаковых емкостях, при одной температуре, на тех же самых электродах, при одинаковом их расположении относительно друг друга. Этот результат совпадает с известными данными [5].

При выяснении физико-энергетических процессов формирования молекул газов, обращает на себя внимание одно энергетическое несоответствие. В работе [1] (с. 293), описан процесс электродной реакции образования молекул водорода из его атомов. Если учесть, что энергия связи атомов водорода в молекуле 436 кДж/ моль, а атомов кислорода – 495 кДж/ моль, (что существенно больше 286 кДж/моль), то следует, что если бы механизм образования газов содержал стадию образования атомов, то эта энергия должна была бы потребляться из электрической цепи с последующим соответствующим выделением тепла. (На основе вышеупомянутого можно выдвинуть гипотезу, что возможно, именно разрывом связей между атомами кислорода при распаде блоков $(\text{H}_2\text{O})_n$ и объясняется большая теплоемкость воды). Однако, так как при электролизе нет такого большого потребления энергии, то естественно предположить, что происходит такое восстановление ионов, которое дает сразу образование именно молекул водорода и кислорода. А так как оба иона (H_3O^+ и OH^-) одновалентны, то получается, что первым требованием к процессу разложения воды с наименьшим энергопотреблением является требование минимальной плотности тока, дающей возможность парного восстановления ионов. Однополярные ионы отталкиваются друг от друга, поэтому скорее всего именно строение воды в виде блоков $(\text{H}_2\text{O})_n$ облегчает задачу снижения энергоемкости процесса электролиза воды.

Экспериментально было установлено, что для стальных электродов минимальная плотность тока составляет около $10 \text{ A}/\text{m}^2$. Современные электролизеры работают с плотностями тока в 1000 и более A/m^2 , поэтому на эти режимы и не было необходимости обращать внимание. Практически все электролизеры имеют аноды и катоды одинаковой площади. В свете вышеизложенного возникает вопрос – что

произойдет, если на одном электроде требование минимальной плотности тока выполняется, а на другом – нет? Эксперименты показали, что возникает переходный процесс, при котором на электроде с меньшей площадью выделяется соответствующий газ, а ионы противоположной полярности просто накапливаются у электрода с большей площадью, на котором не обеспечено условие минимальной плотности тока. Эффект накопления ионов был проверен экспериментально – при смене полярности питания начинается новый переходный процесс, и на электроде с меньшей площадью происходит бурное выделение газа (рис. 4). На этой фазе процесса восстанавливаются ионы, накопленные во время предыдущего переходного процесса.

При визуализации процесса движения части ионов было установлено, что при движении они занимают не все межэлектродное пространство а движутся в ограниченном объеме этого пространства (рис. 5). Предположительно это вызвано следующими причинами. Во-первых, при движении через вязкую среду движение в виде сосредоточенного потока потребует меньше энергии. Во-вторых, в одну сторону движутся ионы одного знака. Вокруг каждого из них образуется магнитное поле. Эти поля будут притягиваться. И в-третьих, распределение электрического поля по всему объему раствора приводит к наибольшей напряженности поля по линии, соединяющей центры плоских и параллельно расположенных электродов и являющейся наименьшим расстоянием между электродами. Именно в направлении этого наикратчайшего расстояния идет движение ионов. Если движение жидкости разрушает этот поток ионов, то начинается процесс его восстановления, аналогичный процессу его формирования в момент включения питания электролитической ячейки.

После достижения потоком ионов второго электрода и установления стационарного режима между электродами была введена электроизоляционная пластина, которая перекрыла 90% сечения раствора электролита. После появления перегородки поток ионов беспрепятственно обогнул эту пластину -перегородку и достиг опять второй электрод. Поток ионов заметен за счет увлекаемых микропузырьков газа, которые образовались в приэлектродном слое, в том числе и за счет захвата проходящих через него электронов. Тот факт, что электроны могут покидать электрод и участвовать в формировании тока через раствор, был подтвержден экспериментально. Например, при прохождении тока через этиловый спирт напряжение между электродами в сто раз превышало напряжение разложения воды, а площадь катода обеспечивала плотность тока, в 5 раз превышающую минимально необходимую для обеспечения выделения водорода. Тем не менее никаких процессов на электродах не было обнаружено, из-за чего и возникла версия чисто электронной проводимости. Кроме того, этот эксперимент доказал, что в таком спирте нет отдельных молекул воды – они все химически связаны с молекулами спирта. Возможно, этим объясняются трудности получения 100% этилового спирта. Наиболее вероятным представляется объединение групп ОН из молекул воды с группами ОН в молекулах спирта по типу объединения самих молекул воды в блоки $(\text{H}_2\text{O})_n$. Возможно, что электрон с поверхности электрода замещает один из электронов в образовавшемся соединении $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - \text{H}_2\text{O} - \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, и далее этот электрон переходит с одной такой группы на другую, аналогично протону в протолитической теории проводимости кислот и щелочей.

Кроме того, в отдельных экспериментах в щелочной ячейке со стальными электродами, содержащими множество острых граней было отмечено образование водорода не столько на катоде, сколько в толще раствора, который становился мутным от обилия микропузырьков. Это можно объяснить стеканием электронов с острых граней электрода и восстановлением ионов водорода, движущихся к нему. В то же время на аноде, где разряжались ионы OH^- , происходило обычное выделение

кислорода. При этом величина тока через ячейку была значительно больше (для используемой конструкции ячейки и электродов – в три раза больше), чем для такого же напряжения питания при обычном электролизе.

При полном перекрытии электроизоляционной перегородкой сечения раствора межэлектродного пространства ток через него, естественно, прекратился. После этого в ней было сделано отверстие малого диаметра (менее 1 мм^2). Ионы, притягиваемые электрическим полем к этому отверстию, по мере приближения к нему испытывают силы отталкивания друг от друга, и образуют два объемных заряда. Если напряжение питания ячейки достаточно велико, то между этими объемными зарядами возникает электрический разряд (как молния между облаками), имеющий цвет, характерный для ионов натрия (эксперимент проходил в растворе NaOH). Практически для этого требуется плотность тока в 10^7 A/ м^2 . Обычно электрические разряды связаны с электродами, и в жидкости начинается их интенсивное разрушение. В данном случае разряд полностью находится в толще раствора и не касается электродов. Можно предположить, что поток электронов через отверстие в электроизоляционной перегородке восстанавливает ионы по обе стороны от отверстия и наблюдаемые пузырьки газов образуются прямо в толще раствора. Энергопотребление при этом примерно в 10 раз больше, чем при обычном электролизе. Это позволяет предположить, что в данном случае происходит восстановление одиночных атомов газов с их последующим объединением в молекулы. В электрическом поле разряда электроны разгоняются и попадают в толщу объемного заряда, где восстанавливают попадающиеся на их пути ионы. Это затрудняет электронам парное восстановление ионов. Отметим, что если получаемый таким способом газ хорошо растворяется в воде (например, хлор), то его молекулы в основном остаются в растворе, окрашивая его в характерный желто-зеленый цвет (напомним, что ионы хлора – бесцветны).

В заключение отметим, что раствор электролита – вещество сложное, в особенностях которого еще предстоит разобраться.

а) Например, после прохождения через него импульсов тока некоторое время сохраняется возбужденное состояние, которое проявляется в виде скачкообразного изменения э.д.с. опущенной в него термопары.

б) Кроме того, в электролитической ячейке будут идти те процессы, которые требуют меньшего расхода электроэнергии . Например, если можно вырвать ионы металла из одного электрода и их движением обеспечить прохождение тока через раствор, то разложения воды вообще не будет. Практически это можно увидеть, например, при электролизе смеси растворов NaNO_3 и NaCl со стальными электродами.

в) И последнее. Проводились также эксперименты с перетеканием раствора по тонкой трубке между разными емкостями, в которых были расположены электроды. Для поддержания той же величины тока при этом требуется больше напряжение, что связано с увеличением сопротивления электролита. Но процесс движения электролита по этой трубке не оказал никакого заметного влияния ни на величину тока, ни на величину сопротивления электролита. Причем скорость движения раствора значительно превышала скорости движения ионов, приведенные в [3].

Отмеченные особенности требуют дальнейшего изучения.

5. Выводы.

1. Получение водорода из воды возможно при затратах электроэнергии вдвое меньше, чем энергия получаемая в результате сжигания водорода.
2. Разложение воды можно проводить с к.п.д. 80% при комнатной температуре.

3. В щелочных ячейках возможно кратковременное получение только одного газа – водорода или кислорода.
4. Экспериментально обнаружено однонаправленное движение ионов между электродами в кислотной среде и локализация пути их движения в растворе.
5. Для образования газов необходима минимальная плотность тока в 10 А/ м^2 .
6. При локальных плотностях тока в 10^7 А/ м^2 в толще раствора возникает искровой разряд, не соприкасающийся с электродами.
7. В процессе формирования тока через раствор участвуют не только ионы, но и электроны.

6. Литература.

1. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М., Высшая школа, 1984 г., изд. 4-е, 520 с.
2. Багоцкий В.С. Основы электрохимии. М., Химия, 1988 г., 400 с.
3. Якименко Л.М. и др. Электролиз воды. М., Химия, 1970, 263 с.
4. Морозов Ю.В. и др. Электролизеры с твердым полимерным электролитом для разложения воды. Журнал депонированных рукописей № 9 2002 г. <http://www4/mte/ru/www/toim.nsf/>.
5. Федотьев Н.П., Алабышев А.Ф., Ротинян А.Л. и др. Прикладная электрохимия. /под ред. проф. Федотьева Н.П. Л.: Гос. НТИ химической литературы, 1962 г. – 639с.