

В.Н. Зайченко, И.А. Слободянюк

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКАХ И МГД-ЭФФЕКТ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ ВОДЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Институт общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского Национальной академии наук Украины
проспект Академика Палладина, 32/34, Киев, 03142, Украина, E-mail: vania7@ukr.net*

Известно, что воздействие внешнего постоянного магнитного поля (ПМП) на процесс электролиза воды при определенной ориентации векторов электрического и магнитного полей снижает перенапряжение выделения водорода и кислорода. Механизм такого действия за счет образования магнитогидродинамических микровихрей электролита вокруг пузырьков, облегчающих их отрыв от электродов, т.е. удаление продуктов электролиза, может иметь место, но он не согласуется с полученными нами результатами. Нами обнаружено, что под действием ПМП в момент отрыва от электрода и на начальном участке траектория движения пузырьков близка к параболической, которая далее сменяется прямолинейным вертикальным движением. Согласно закону Лоренца определено, что пузырьки водорода несут отрицательный заряд, а кислорода – положительный во всем интервале рН, в том числе и при рН = 2.5, когда заряд пузырьков за счет адсорбции ионов из электролита равен нулю. Известно, что однородное ПМП действует только на движущиеся заряды. Высказано предположение, что такими движущимися по поверхности пузырьков зарядами могут быть эмитированные с катода электроны.

Ключевые слова: гидратированные электроны, магнитное поле, перенапряжение, сила Лоренца, электролиз

ВВЕДЕНИЕ

Инжекция электронов из газовой фазы в водные растворы электролитов в условиях низкотемпературного плазменного электролиза (НТПЭ) хорошо известна [1]. Идея НТПЭ, которую впервые осуществил Я. Губкин, принадлежит Е. Варбургу [2]. Далее она была развита в [3, 4] и последующими исследователями доведена до создания новой ветви технической электрохимии [1].

Эмитированные с катода электроны, попадая в водную среду, гидратируются, образуя очень активные гидратированные электроны. Гидратированные электроны образуются также при воздействии на водную среду ионизирующего излучения. Например, в [5] показано, что в поверхностных слоях морской воды под действием солнечного света возникают стационарные концентрации гидратированных электронов.

Возможность образования гидратированных электронов в условиях обычного электролиза водных растворов отмечена в обзоре [6]. Доказательства эмиссии электронов с катода в электролит приведены в [7], где

авторами показано, что обнаруженное в [8] восходящее струйное течение электролита, образуемое на микрокатоде, расположенном в вертикальном капилляре, отклоняющееся при действии однородного ПМП от вертикали в соответствии с законом Лоренца, является потоком эмитированных электронов с микроэлектрода. Эти электроны мгновенно гидратируются и образуют восходящую струю диаметром на порядок меньше диаметра капилляра. Подобные струи наблюдали также в [4]. Некоторые экспериментальные факты, косвенно подтверждающие образование гидратированных электронов в процессе электролиза, приведены в [9].

Целью настоящей работы было получение дополнительных экспериментальных данных в подтверждение такой гипотезы.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовались следующие электролиты: 30 % раствор КОН (1), 0.05 М раствор серной кислоты (2), раствор серной кислоты с рН 2.5 (3) и раствор медного купороса (200 г/л) с серной кислотой (50 г/л) (4).

Ячейкой служила прямоугольная кювета из органического стекла с внутренним сечением 16×135 и высотой 90 мм. В качестве электродов использовались капилляры из нержавеющей стали с наружным и внутренним диаметрами соответственно 0.5 и 0.3 мм, рабочей поверхностью являлись торцы капилляров площадью $1.26 \times 10^{-3} \text{ см}^2$. Электроды вмонтированы в дно ячейки без выступающих поверхностей на дистанции 4 мм относительно друг друга и размещены параллельно и перпендикулярно оси магнитопровода (оси магнитного поля). К нижним торцам капилляров через штуцеры подведены силиконовые трубки для автономной подачи газов. Источником стабилизированного питания служил прибор ТЕС-14. Однородное ПМП индукцией до 0.8 Тл создавали лабораторным электромагнитом с регулируемым питанием постоянным током. Сечение полюсов электромагнита и зазор между ними составляли 70×100 и 20 мм

соответственно. Калибровку электромагнита производили с помощью тесла-амперметра Ф 4354/1. Разница в величине индукции ПМП в центре зазора и на его краях составляла не более 2.

Опыт 1. Заполнили ячейку электролитом (1). Ток регулировали таким образом, чтобы скорость выделения пузырьков водорода на катоде составляла не более $10 \div 15 \text{ с}^{-1}$, при этом плотность анодного и катодного тока составляла 40 мА/см^2 . При отсутствии ПМП пузырьки водорода и кислорода под действием архимедовой силы всплывают строго вертикально (рис. 1 а). Под действием ПМП индукцией 0.8 Тл траектории движения пузырьков водорода и кислорода в начальный период отклоняются в противоположные стороны в плоскостях, перпендикулярных вектору магнитной индукции B^{\rightarrow} (рис. 1 б). При изменении направления вектора B^{\rightarrow} на противоположное изменяется на противоположное и отклонение траекторий (рис. 1 в).

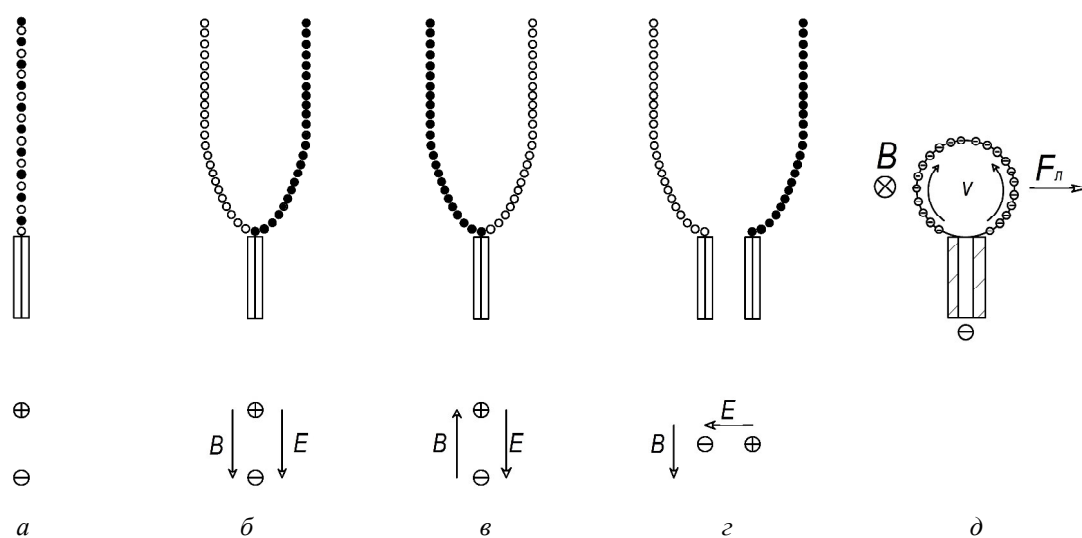


Рис. 1. Траектория движения пузырьков водорода (○) и кислорода (●): а – в отсутствие магнитного поля; б, в, г – при воздействии магнитного поля с различной ориентацией векторов магнитного B^{\rightarrow} и электрического E^{\rightarrow} полей; д – схема движения эмитированных электронов с катода, вектор B^{\rightarrow} направлен по лучу зрения

Данные опыта 1 говорят о том, что по поверхности пузырьков водорода и кислорода движутся заряды противоположного знака, на которые действует сила Лоренца, отклоняющая их траектории ортогонально векторам скорости движения зарядов v и магнитной индукции B^{\rightarrow} . Электрической составляющей силы Лоренца ($q \times E^{\rightarrow}$), согласно уравнению $F_L = q \times E^{\rightarrow} + q(v \times B^{\rightarrow})$, пренебрегаем, т.к. в отсутствие ПМП

траектории движения пузырьков не отклоняются. При этом направление отклонения пузырьков соответствует отрицательному заряду на пузырьках водорода, создаваемому движущимися по их поверхности от катода отрицательными частицами, и положительному заряду на пузырьках кислорода. Существенно, что на начальном участке траектория движения пузырьков близка

к параболической, которая далее сменяется прямолинейным вертикальным движением. Это говорит о том, что заряды на пузырьках нейтрализуются.

Опыт 2. Аналогично опыту 1, но при условии перпендикулярности векторов B^{\rightarrow} и E^{\rightarrow} . В данном случае также наблюдается отклонение движения пузырьков водорода и кислорода от вертикали в направлениях, соответствующих закону Лоренца (правило левой руки), причем траектории движения пузырьков не смещаются вдоль вектора B^{\rightarrow} (рис. 1 з). Пузырьки водорода в этом случае также заряжены отрицательно, а кислорода – положительно.

Опыт 3. Аналогично опыту 1, но в 0.05 М растворе H_2SO_4 . Пузырьки водорода и кислорода движутся по таким же траекториям, как и в щелочном растворе. Это свидетельствует о том, что пузырьки водорода заряжены отрицательно, а кислорода – положительно.

Опыт 4. Аналогично опыту 3, но в растворе H_2SO_4 с pH 2.5. Траектория движения пузырьков такие же, как в опыте 3. Значит, заряжены пузырьки аналогично.

Опыт 5. Заполнили ячейку электролитом (4), при электролизе которого при плотности тока ниже 20 mA/cm^2 отсутствует газовыделение. Через капиллярный катод барботировали с помощью микрокомпрессора пузырьки воздуха. В начальный период диаметр пузырьков воздуха, выходящих из капиллярного катода, составлял $\sim 0.5 \text{ мм}$. При включении ПМП вплоть до индукции 0.8 Тл отклонение траектории движения пузырьков не наблюдалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам опытов 1–4, выделяющиеся на катоде пузырьки водорода при электролизе воды заряжены отрицательно, кислорода – положительно, как в щелочных, так и в кислых растворах. В опытах 1, 3, 4 кондукционное воздействие на электролит как проводник с током отсутствует, так как векторы B^{\rightarrow} и E^{\rightarrow} параллельны. Поэтому объяснить ход траектории движения пузырьков вследствие возникающих вихрей электролита нельзя из-за отсутствия последних. В опыте 2 при перпендикулярных B^{\rightarrow} и E^{\rightarrow} возникновение такого вихря возможно, но, в силу малой объемной плотности тока в электролите, он не

возникает, иначе траектория движения пузырьков сместились бы относительно плоскости, перпендикулярной вектору B^{\rightarrow} , проходящей через капиллярные электроды.

Известно, что ПМП действует только на движущиеся электрические заряды.

В [10] показано, что в отсутствие ПАВ электролитические пузырьки водорода и кислорода заряжены отрицательно при $\text{pH} > 3$ и положительно при $\text{pH} < 2$, при этом точка нулевого заряда лежит в интервале $\text{pH} 2\div 3$, т.е. пузырьки не заряжены. Из этого следует, что при движении, под действием ПМП, пузырьки водорода и кислорода отклонялись бы в одну сторону. Это противоречит результатам опытов 1–3, которые демонстрируют, что пузырьки водорода и кислорода отклоняются в противоположные стороны, что возможно только в том случае, если они несут противоположные заряды. А это противоречит данным [10]. Значит, траектории движения пузырьков при их отрыве от электродов отклоняются от движения по вертикали не за счет неподвижных зарядов, образованных адсорбированными ионами, а за счет динамических зарядов. Подтверждением этому служит опыт 4, выполненный в растворе H_2SO_4 при pH 2.5, когда поверхность пузырьков не заряжена, т.е. в точке нулевого заряда, а они отклоняются так же, как в опытах 1–3.

Существенным является факт действия силы Лоренца на пузырьки в момент отрыва их от электродов, когда скорость их всплытия равна нулю. Значит, равна нулю и скорость стационарных зарядов, образованных за счет адсорбированных ионов. Поэтому причиной возникновения силы Лоренца могут быть только динамические заряженные частицы. Такими частицами на катоде вероятнее всего являются эмитированные электроны. Они, двигаясь по поверхности пузырьков в направлении ортогональном ПМП, сообщают пузырькам начальный импульс, который совместно с архимедовой силой заставляет их двигаться в начальный период по параболической траектории, а далее, в связи с высокой реакционной способностью гидратированных электронов, пузырьки теряют заряд и движутся по вертикали (рис. 1 д). На аноде генерируемыми положительно заряженными частицами, предположительно, могут быть H_2O^+ .

Сказанное не противоречит теории возникновения стационарных зарядов на электролитических пузырьках благодаря адсорбции ионов. Но ПМП, как уже сказано, на прилипшие пузырьки с такими зарядами не действует и не может сообщить им начальный импульс, который наблюдается в опытах 1–4. Кроме того, переход траекторий в прямолинейный участок свидетельствовал бы о десорбции таких зарядов, что трудно объяснить. Поэтому адсорбированные заряды в условиях выполненных опытов не могут играть существенную роль. Об этом свидетельствуют и результаты опытов 1–4, когда при переходе из щелочной области в кислую, согласно адсорбционной теории, изменяется знак заряженных пузырьков и траектории их движения должны были бы измениться на противоположные, но этого не происходит. Более того, при pH 2.5 (опыт 4), когда пузырьки не заряжены, траектории их движения остаются такими же, как в опытах 1–3.

В [11] доказано, что внешнее ПМП при электролизе воды снижает перенапряжение выделения водорода и кислорода, что очень важно для практики получения экологически чистого энергоносителя. Такое снижение перенапряжения авторы объясняют возникновением на вертикальных электродах принудительной конвекции за счет градиента плотности раствора и магнитогидродинамических потоков.

Авторы [12] отмечают образование вокруг выделяющихся электролитических пузырьков микровихрей при воздействии ПМП за счет искривления силовых линий тока у поверхности пузырьков и возникновения составляющей вектора тока, перпендикулярной вектору \vec{B} . Однако, они не отмечают, что ниже экватора пузырьков должны образовываться микровихри противоположного направления (рис. 2).

Такие микровихри могут способствовать отрыву пузырьков от поверхности электродов и снижать перенапряжения выделения электролитических газов, но траектории движения пузырьков не могут носить упорядоченный характер, как это имеет место в нашем случае (опыты 1–4). Поэтому они играют менее существенную роль.

В некотором согласии с полученными результатами находятся данные работ Э. Фукса с сотрудниками, опубликованные в обзоре [13].

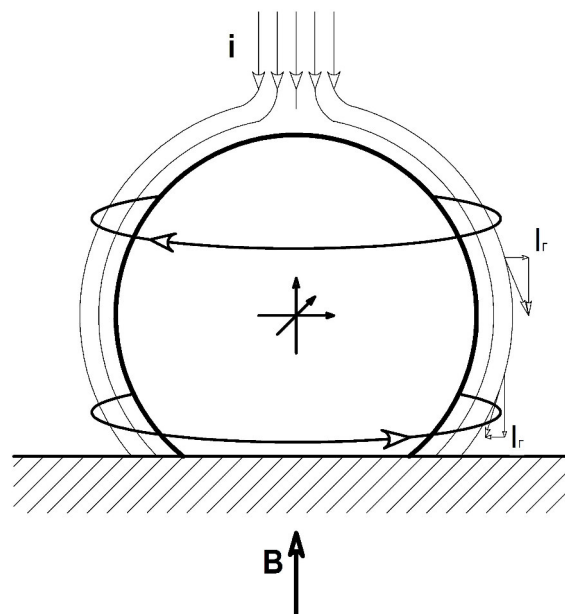


Рис. 2. Образование МГД-микровихрей вокруг электролитического пузырька, I_r – горизонтальная составляющая вектора тока

В 1893 г. сэр В. Армстронг выполнил такой опыт: два стеклянных стакана наполнил химически чистой водой, соединил их хлопковым шнуром, опустил в стаканы две металлические пластинки и, после подачи на них высокого постоянного напряжения, наблюдал образование по шнуру между стаканами водяного мостика. Спустя некоторое время шнур перескакивал из одного стакана в другой, а между стаканами образовывался водяной мостик. Изучение этого явления продолжил Э. Фукс с сотрудниками.

Э. Фукс показал [13], что перемилька из воды образуется и без хлопкового шнура, причем ее длина при раздвижении стаканчиков может достигать более 30 мм, а время до разрушения – десятков минут. Он назвал эту перемильку «floating water bridge» (висячий водяной мостик).

Однако, некоторые экспериментальные данные в публикациях Э.Фукса и др. ученых пока не нашли удовлетворительного объяснения.

В этой связи полезно рассмотреть висячий водяной мостик как элемент электрохимической системы. Действительно, два стаканчика, наполненные доверху очень чистой дистиллированной водой с начальной электропроводимостью порядка 0.06 мкСм/см с опущенными в них платиновыми электродами и соединенными водяным мостиком,

возникающим при поляризации их постоянным напряжением до 25 кВ, образуют электрохимическую систему, хотя и в экстремальном варианте (рис. 3). Поэтому некоторые явления, возникающие в такой системе, можно объяснить с позиций электрохимии.

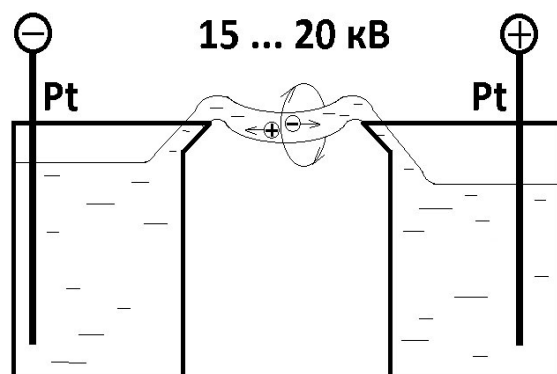


Рис. 3. Висящий водяной мостик, образующийся при поляризации платиновых электродов постоянным напряжением до 25 кВ

В [14] обнаружено, что после включения напряжения в катодном пространстве pH повышается до 9 единиц, в анодном уменьшается до 4, причем авторы, на наш взгляд ошибочно, утверждают, что электролиз при этом не протекает. При прохождении тока до 5 мА, обнаруженного Фуксом, в электрохимической системе обязательно протекает электролиз, в данном случае электролиз воды, а продукты электролиза (водород и кислород) при такой малой плотности тока растворяются в воде и визуально не обнаруживаются.

Увеличение pH в прикатодном пространстве легко объяснить как протеканием электролиза, так и весьма вероятной при такой напряженности электрического поля холодной эмиссией электронов с отрицательно поляризованного электрода (катада). Здесь полезно вспомнить опыты М. Розенфельд, выполненные в 1922 г. [4] и, по ее мнению, прямо доказывающие, что с платинового или медного катада, поляризованного от катушки Румкорфа, электроны эмитируют через воздушный зазор толщиной 2 мм в 0.25 М раствор иодида калия. При добавлении в раствор крахмала или фенолфталеина наблюдается окрашенная струя, проникающая с большой скоростью вглубь кюветы на расстояние до 9÷10 см (рис. 4).

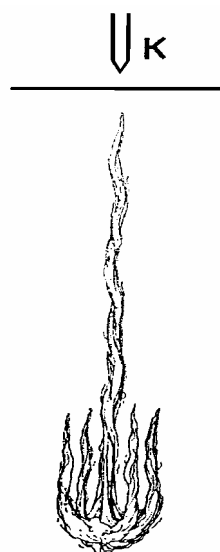


Рис. 4. Траектория движения электронов, эмитированных с катада (К) в водном растворе [4]

При помещении кюветы между полюсами постоянного магнита траектория струи отклоняется в сторону в соответствии с воздействием магнитного поля на движущиеся отрицательно заряженные частицы (рис. 5). М. Розенфельд утверждает, что с помощью окрашенных струй «мы видим пути и движение электронов в растворе».

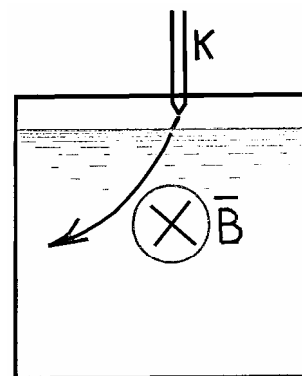
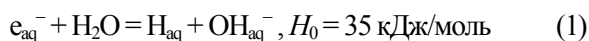


Рис. 5. Отклонение траектории электронов, эмитированных с катада (К) в водном растворе, под действием магнитного поля [4]

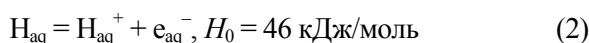
В соответствии с современными взглядами, эмитированные электроны, попадая в воду, образуют так называемые гидратированные электроны e_{aq}^- . Они обладают очень высокой реакционной способностью и, так как в очень чистой воде, кроме молекул воды, ионов H^+ и OH^- , ничего нет, то они реагируют с протонами, образуя H и H_2O либо, взаимодействуя между собой, образуют H_2 и $2OH^-$. При этом в катодном пространстве

повышается относительная концентрация ионов OH^- , что приводит к увеличению рН.

Далее, в прикатодном пространстве зафиксировано понижение температуры. Объяснить этот факт можно протеканием эндотермических реакций. Большинство реакций с участием гидратированных электронов e_{aq}^- в воде протекают с высокой скоростью и являются экзотермическими [15]. И только две реакции протекают с поглощением тепла. Это исключительно медленная реакция гидратированного электрона с водой:



и ионизация гидратированного атома водорода:



(H_0 – стандартная энтальпия реакции).

Возможно, именно эти эндотермические реакции и понижают температуру в катодном стаканчике, что является косвенным подтверждением эмиссии электронов.

В начальный период происходит перетекание воды по мостику из анодного стаканчика в катодный, затем уровни воды стабилизируются благодаря встречному потоку за счет гидростатического давления, как в сообщающихся сосудах. Это связано с тем, что присутствующие в воде заряженные частицы, в том числе электроны, при миграции в электрическом поле переносят с собой гидратную оболочку. Так как они связаны с различным количеством молекул воды, обладают различной подвижностью, то и количество переносимой воды в разных направлениях различно.

Э. Фукс с соавторами наблюдали также повышение температуры в мостике, что связано, вероятно, с выделением джоулева тепла благодаря тому, что плотность тока в мостике из-за малого сечения больше, чем в стаканчиках.

С помощью трассера, в качестве которого использовали порошок полиамида со средним размером частиц 5 мкм, авторы обнаружили вращение наружного слоя воды в мостике по часовой стрелке (если смотреть со стороны анодного стаканчика) с тангенциальной скоростью 0.3 м/с при диаметре мостика $2 \div 3$ мм. Аксиальная скорость при этом составляла 0.2 м/с. Объяснить такое вращение можно только с помощью магнитной

гидродинамики. Если в однородном электрическом поле заряженные частицы движутся прямолинейно, то для вращательного движения или движения по спирали необходимо наличие магнитного поля. Источниками такого поля в опытах Э. Фукса с сотрудниками могли быть геомагнитное поле, собственное магнитное поле электрохимической системы или техногенные поля от других источников.

Известно, что в центральной Европе усредненная индукция вертикальной составляющей геомагнитного поля равна примерно 0.5×10^{-4} Тл. Диаметр окружности, по которой вращается гидратированный электрон, движущийся с аксиальной скоростью 0.2 м/с, обладающий зарядом 1.6×10^{-19} Кл и массой вместе с гидратной оболочкой из 4-х молекул воды 1.2×10^{-25} кг, составляет 6 мм. Это величина такого же порядка, как и диаметр мостика. Следует отметить, что гидратированные протоны $(\text{H}_3\text{O} \times 3\text{H}_2\text{O})^+$, имея противоположный знак заряда и мигрируя в противоположном направлении, вращаются аналогично электронам по окружности диаметром 6.05 мм, а гидроксид-ионы $(\text{OH} \times 3\text{H}_2\text{O})^-$ – 5.04 мм.

Если на катоде происходит эмиссия электронов, то на аноде, в силу принципа электронейтральности объема воды, должно образовываться эквивалентное количество положительных частиц. Такими частицами могут быть заряженные молекулы воды H_2O^+ (т.е. $\text{OH} + \text{H}^+$) [15]. Они реагируют с другими частицами, что аналогично захвату положительной дырки. При этом в воде сохраняется баланс по заряженным частицам и принцип электронейтральности не нарушается. Не нарушается также и первый закон Фарадея.

Рассмотрение всячего водяного мостика с таких позиций позволит стимулировать как дальнейшие исследования роли гидратированных электронов в электрохимических процессах, так и структуры воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в момент роста и отрыва пузырьков водорода и кислорода от поверхности электродов при электролизе воды под воздействием внешнего постоянного магнитного поля с индукцией $0.1 \div 0.8$ Тл на них действует сила Лоренца, которая совместно с архимедовой силой в начальный период

придает траекториям движения пузырьков параболический вид. Это указывает на то, что по поверхности пузырьков в этот период движутся заряженные частицы. Далее пузырьки движутся вертикально, что свидетельствует о нейтрализации таких зарядов.

Характер траектории движения не меняется при переходе из щелочной области в кислую. Более того, характер траектории не меняется при $pH = 2.5$ в точке нулевого заряда поверхности пузырьков. Следовательно, адсорбированные из электролита ионы не играют существенной роли в динамике процесса.

Сделано предположение, что на катоде движущимися по поверхности пузырьков

заряженными частицами могут быть эмитированные электроны, которые гидратируются и реагируют с другими частицами, присутствующими в растворе. При этом теряется заряд на пузырьках, о чем свидетельствует дальнейшее их движение по вертикали.

Природа движущихся зарядов на пузырьках кислорода пока не выяснена. Такими носителями заряда могут быть, например, H_2O^+ .

Показано также, что ПМП действует только на генерируемые на электродах пузырьки. Траектории движения барботируемого воздуха через поляризованные капиллярные электроды не отклоняются от вертикали.

Поверхні явища на електролітичних газових бульбашках і МГД-ефект при електролізі води в магнітному полі

В.Н. Зайченко, І.А. Слободянюк

*Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського Національної академії наук України
просп. Академіка Палладіна, 32/34, Київ, 03142, Україна, vania7@ukr.net*

Відомо, що вплив зовнішнього постійного магнітного поля (ПМП) на процес електролізу води при певній орієнтації векторів електричного та магнітного полів знижує перенапруження виділення водню та кисню. Механізм такої дії за рахунок утворення магнітогідродинамічних мікрівихорів електроліту навколо бульбашок, що полегшують їх відрив від електродів, тобто видалення продуктів електролізу, може мати місце, але він не узгоджується з одержаними нами результатами. Нами виявлено, що під дією ПМП в момент відриву від електрода і на початковій ділянці траєкторія руху бульбашок близька до параболическої, яка далі змінюється прямолінійним вертикальним рухом. Згідно закону Лоренца визначено, що бульбашки водню несуть негативний заряд, а кисню - позитивний у всьому інтервалі pH, в тому числі і при $pH = 2.5$, коли заряд бульбашок за рахунок адсорбції іонів з електроліту дорівнює нулю. Відомо, що однорідне ПМП діє лише на рухомі заряди. Висловлено припущення, що такими рухомими зарядами по поверхні бульбашок можуть бути емітовані з катода електрони.

Ключові слова: *гідратовані електрони, магнітне поле, перенапруження, сила Лоренца, електроліз*

Surface phenomena on the electrolyte gas bubbles and the MHD effect under the electrolysis of water in a magnetic field

V.N. Zaichenko, I.A. Slobodyanyuk

*Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
32/34 Academician Palladin Avenue, Kyiv, 03142, Ukraine, vania7@ukr.net*

It is known that effect of an external constant magnetic field (CMF) on the process of electrolysis of water at a certain orientation of the vectors of the electric and magnetic fields reduces the overvoltage of hydrogen and oxygen evolution. The mechanism of this action due to the formation of magneto-hydrodynamic microvortices of electrolyte

around the bubbles, facilitating their separation from the electrodes, i.e. removal electrolysis products, can take place, but it is not consistent with our results. We have found that due to the influence of CMF in the moment of separation from the electrode and within the initial section, the trajectory of the bubble is close to parabolic, which is then changed to a straight vertical motion. According to the Lorentz law, it has been found that hydrogen bubbles are negatively charged and those of oxygen - positively in the entire range of pH, including pH of 2.5, when the charge of bubbles due to adsorption of ions from the electrolyte is zero. It is known that the homogeneous CMF influence only on moving charges. It is suggested that such charges moving over the surface of the bubbles may be issued from the cathode electrons.

Keywords: electrolysis, hydrated electrons, Lorentz force, magnetic field, overpotential

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко А.В., Кублановский В.С., Пивоваров А.А., Пустовойтенко В.П. Низкотемпературный плазменный электролиз: теория и практика. – Днепропетровск: ООО «Акцент ПП», 2013. – 230 с.
2. Gubkin Y. Elektrolytische Metallabscheidung an der freien Oberfläche einer Salzlösung // *Ann. Phys. Chem.* – 1887. – V. 32. – P. 114–115.
3. Makowetsky A. Über die Bildung von Wasserstoffsperoxyd, Salpetersäure und Ammoniak bei der Glimmbogenentladung, unter Verwendung von Wasser als einer Elektrode // *Z. Elektrochem. Angewandte. Phys. Chem.* – 1911. – V. 17, N 6. – P. 217–235.
4. Писаржевский Л.В., Розенберг М. Электрон в химии растворов и в электрохимии. – Харьков: Гос. из-во Украины, 1923. – 128 с.
5. Пармон В.Н. Проблема фотокаталитического разложения воды. Фотокаталитическое преобразование солнечной энергии. Ч. 2. Молекулярные системы для разложения воды. – Новосибирск: Наука, 1985. – 246 с.
6. Антропов Л.И. Сольватированные электроны и их возможная роль в электродных процессах // *Итоги науки и техники. Т.6. Электрохимия.* – Москва: ВИНТИ, 1971. – 326 с.
7. Сколунов А.В., Томилов А.П. О возможном участии гидратированных электронов в процессе электролиза водных растворов // *Электрохимия.* – 1992. – Т. 28, № 6. – С. 887–892.
8. Шорыгин А.П., Казарян Э.В., Алимова Р.З. Действие магнитного поля на струйные течения в электрохимической ячейке с микроэлектродом в канале // *Электрохимия.* – 1979. – Т. 15, № 5. – С. 678–680.
9. Зайченко В.Н. Движение электролита и газовых пузырьков при электролизе в магнитном поле // *Журн. прикл. химии.* – 2012. – Т. 85, № 11. – С. 1888–1891.
10. Brandon N.P., Kelsall G.H., Levine S., Smith A.L. Interfacial electrical properties of electrogenerated bubbles // *J. Appl. Electrochem.* – 1985. – V. 15, N 4. – P. 485–493.
11. Iida T., Matsushima H., Fukunaka Y. Water electrolysis under a magnetic field // *J. Electrochem. Soc.* – 2007. – V. 154, N 8. – P. 112–115.
12. Koza J.A., Mühlenhoff S., Źabiński P. et al. Hydrogen evolution under the influence of a magnetic field // *Electrochim. Acta.* – 2011. – V. 56, N 6. – P. 2665–2675.
13. Fuchs E.C., Wexler A.D., Paulitsch-Fuchs A.H. et al. The Armstrong experiment revisited // *Eur. Phys. J. Special Topics.* – 2014. – V. 223, N 5. – P. 959–977.
14. Woisetschläger J., Gatterer K., Fuchs E.C. Experiments in a floating water bridge // *Exp. Fluids.* – 2010. – V. 48, N 1. – P. 121–131.
15. Харп Э., Анбар М. Гидратированный электрон. – Москва: Мир, 1973. – 280 с.

REFERENCES

1. Kravchenko A.V., Kublanovsky V.S., Pivovarov A.A., Pustovoitenko V.P. *Low-Temperature Plasma Electrolysis: Theory and Practice.* (Dnepropetrovsk: Aktsent PP Ltd, 2013).
2. Gubkin Y. Elektrolytische Metallabscheidung an der freien Oberfläche einer Salzlösung. *Ann. Phys. Chem.* 1887. **32**: 114.
3. Makowetsky A. Über die Bildung von Wasserstoffsperoxyd, Salpetersäure und Ammoniak bei der Glimmbogenentladung, unter Verwendung von Wasser als einer Elektrode. *J. Electrochem. Appl. Phys. Chem.* 1911. **17**(6): 217.

4. Pizarzhevskii L.V., Rozenberg M. *Electron in the Chemistry of Solutions and in Electrochemistry*. (Kharkiv: State Publishing House of Ukraine, 1923).
5. Parmon V.N. Problem of photocatalytic water decomposition. In: *Photocatalytic Solar Energy Conversion*. Part 2. Molecular System for Water Decomposition. (Novosibirsk: Nauka, 1985).
6. Antropov L.I. Solvated electrons and their possible role in electrode processes. In: *Itogi nauki i tekhniki. T.6. Elektrokimiya*. (Moskva: VINITI, 1971). [in Russian].
7. Skolunov A.V., Tomilov A.P. On the possible participation of hydrated electrons in the electrolysis of aqueous solutions. *Elektrokimiya*. 1992. **28**(6): 887. [in Russian].
8. Shorygin A.P., Kazaryan E.V., Alimova R.Z. Action of magnetic field on jet flows in electrochemical cell with microelectrode in channel. *Elektrokimiya*. 1979. **15**(5): 678. [in Russian].
9. Zaichenko V.N. Motion of electrolyte and gas bubbles during electrolysis in a magnetic field. *Journal of Applied Chemistry (Zhurnal prikladnoj khimii)*. 2012. **85**(11): 1888. [in Russian].
10. Brandon N.P., Kelsall G.H., Levine S., Smith A.L. Interfacial electrical properties of electrogenerated bubbles. *J. Appl. Electrochem*. 1985. **15**(4): 485.
11. Iida T., Matsushima H., Fukunaka Y. Water electrolysis under a magnetic field. *J. Electrochem. Soc.* 2007. **154**(8): 112.
12. Koza J.A., Mühlenhoff S., Żabiński P., Nikrityuk P.A., Eckert K., Uhlemann M., Gebert A., Weier T., Schultz L., Odenbach S. Hydrogen evolution under the influence of a magnetic field. *Electrochim. Acta*. 2011. **56**(6): 2665.
13. Fuchs E.C., Wexler A.D., Paulitsch-Fuchs A.H., Agostinho L.L.F., Yntema D., Woisetschläger J. The Armstrong experiment revisited. *Eur. Phys. J. Special Topics*. 2014. **223**(5): 959.
14. Woisetschläger J., Gatterer K., Fuchs E.C. Experiments in a floating water bridge. *Exp. Fluids*. 2010. **48**(1): 121.
15. Hart E., Anbar M. *The hydrated electron*. (Moscow: Mir, 1973).

Поступила 12.06.2015, принята 24.11.2015