УДК 533.9

Т.Е. Бутырина, канд. хим. наук,
А.П. Тищенко, канд. техн. наук, доц.,
С.В. Трещук, магистр,
Укр. гос. хим.-технол. ун-т, г. Днепропетровск

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОВЕСНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Т.Є. Бутиріна, Г.П. Тищенко, С.В. Трещук. Особливості електролізу води в умовах нерівноважної низькотемпературної плазми. Розглядається процес синтезу газоподібного водню в умовах нерівноважної низькотемпературної плазми. Отримано рівняння залежності кількості бульбашок і швидкості їх руху в рідкій фазі від катодної густини струму. Показано, що кількість газових бульбашок зворотно пропорційна густині струму, а швидкість їх руху прямо пропорційна струмовому навантаженню.

Ключові слова: нерівноважна низькотемпературна плазма, електроліз води, водень.

Т.Е. Бутырина, А.П. Тищенко, С.В. Трещук. Особенности электролиза воды в условиях неравновесной низкотемпературной плазмы. Рассмотрен процесс синтеза газообразного водорода в условиях неравновесной низкотемпературной плазмы. Получены уравнения зависимости количества пузырьков и скорости их всплытия от катодной плотности тока. Показано, что количество газовых пузырьков обратно пропорционально плотности тока, а скорость их всплытия прямо пропорциональна задаваемой токовой нагрузке.

Ключевые слова: неравновесная низкотемпературная плазма, электролиз воды, водород.

T.E. Butyrina, A.P. Tishchenko, S.V. Treshchuk. Features of water electrolysis in the conditions of nonequilibrium low-temperature plasma. The process of synthesizing gaseous hydrogen in the conditions of nonequilibrium low-temperature plasma is considered. The equations of dependence of quantity of bubbles and the speed of their emersion upon the cathode current density are obtained. It is shown that the quantity of gas bubbles is inversely proportional to the current density, and the speed of their emersion is directly proportional to the set current loading.

Keywords: non-equilibrium low-temperature plasma, water electrolysis, hydrogen.

Водород — эффективное экологически безопасное топливо, являющееся альтернативой широко используемым нефте- и газопродуктам, а также реагент в процессах производства аммиака, метанола и жидких углеводородов [1]. Известны несколько способов получения водорода: паровая конверсия легких углеводородов, газификация угля, электролиз воды и др. [2...4]. Перечисленные способы имеют ряд недостатков, связанных, в первую очередь, с необходимостью очистки получаемого продукта от примесей, кроме того, при электролизе воды используются растворы щелочей (для улучшения электропроводности), что требует применения материалов, устойчивых в агрессивных средах. Задачей данной работы явилось изучение процесса синтеза водорода в условиях неравновесной низкотемпературной плазмы.

Методика эксперимента

Процесс получения водорода проводился при помощи лабораторной плазмохимической установки в однодуговом плазменном реакторе дискретного типа объемом 0,13 дм³. Рабочим электродом служила полированная горизонтальная пластина из нержавеющей стали с площадью поверхности 4·10⁻⁴ м². Для фоторегистрации процесса формирования пузырьков водорода использовали цифровую фотокамеру “Canon A 380” и оптический микроскоп МБС-2. Электролиз происходил в дистиллированной и водопроводной воде в течение 20 мин.

Результаты исследований и их обсуждение

В начальный момент действия неравновесной низкотемпературной плазмы на торцевых поверхностях электрода формируются газовые пузыри, которые постепенно передвигаются к центру катода, заполняя всю его поверхность (рис. 1).

Рис. 1. Процесс образования газовых пузырей на катоде

В результате пересыщения приповерхностного слоя молекулами растворенного газа происходит постепенный рост газового пузырька и его превращение из плоского в сферический. Сформировавшийся пузырек отрывается от поверхности катода под действием электрического поля и выталкивающей силы (рис. 2).

Количество образующегося на катоде водорода определяется законом Фарадея и зависит от количества прошедшего через систему электричества и материала электрода. Перенапряжение разряда ионов водорода на нержавеющей стали мало, а в используемом растворе отсутствуют ионы, способные разряжаться на катоде параллельно с водородом. Предполагается, что водород разряжается со 100 %-м выходом по току. На основании полученных данных о зависимости среднего размера газового пузырька от плотности тока и предположив, что оторвавшийся от катодной поверхности пузырек имеет сферическую форму, определялась зависимость количества газовых пузырьков от плотности тока (рис. 3).

Рис. 2. Схема роста газового пузыря на поверхности катода

Рис. 3. Зависимость количества газовых пузырьков H_2 от плотности тока

Рис. 4. Зависимость количества газовых пузырьков H_2 от плотности тока в логарифмических координатах

Прологарифмировав полученную зависимость, получили прямую в координатах $\ln N - \ln i$ (рис. 4), а после обработки — уравнение зависимости количества пузырьков от плотности тока

$$N = \frac{6,87 \cdot 10^{18}}{i^{4,4}}. \quad (1)$$

С ростом плотности тока уменьшается количество пузырьков образующегося водорода.

Скорость всплытия газовых пузырьков зависит от их размера, определяемого, в свою очередь, плотностью тока, и может быть рассчитана по формуле Стокса

$$W = \frac{d^2 g \Delta \rho}{18 \mu}, \quad (2)$$

где d — диаметр газового пузырька, м;

g — ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

$\Delta \rho$ — разность плотностей жидкой и газовой фаз, кг/м^3 ;

μ — динамическая вязкость жидкой фазы, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Графическая зависимость скорости всплытия газовых пузырьков от плотности тока представлена на рис. 5.

Приведенная зависимость линейна и описывается уравнением

$$W = -18 \cdot 10^{-4} + 1,28 \cdot 10^{-5} \cdot i. \quad (3)$$

Скорость всплытия газового пузырька прямо пропорциональна катодной плотности тока. Очевидно, что существует минимальная плотность тока, при которой может сформироваться газовый пузырек определенного размера, для которого сила выталкивания будет равна силе прилипания, что даст ему возможность оторваться от катодной поверхности. Из уравнения (3) следует, что минимальное значение плотности тока $i = 141 \text{ A/дм}^2$.

Таким образом, на основании экспериментальных данных, а также результатов их математической обработки получены уравнения зависимости количества пузырьков и скорости их всплытия от катодной плотности тока. Показано, что количество газовых пузырьков обратно пропорционально плотности тока, а скорость их всплытия прямо пропорциональна задаваемой токовой нагрузке.

Литература

1. Granovskii, M. Air pollution reduction via use of green energy sources for electricity and hydrogen production / M. Granovskii, I. Dincer, M.A. Rosen // Atmos. Environ. — 2007. — Vol. 41, № 8. — P. 1777 — 1783.

Рис. 5. Зависимость скорости всплытия газовых пузырьков H_2 от плотности тока

2. Нефедов, В.Г. Выделение газовой фазы при электролизе воды в полях массовых и электрических сил / В.Г. Нефедов. Моногр. — Днепропетровск: ГВУЗ УГХТУ, 2008. — 292 с.
3. Биллитер, Ж. Промышленный электролиз водных растворов / Ж. Биллитер. — М.: Госхимиздат, 1959. — 406 с.
4. Степанов, А.В. Получение водорода и водородсодержащих газов / А.В. Степанов. — К.: Наук. думка, 1982. — 312 с.

References

1. Granovskii, M. Air pollution reduction via use of green energy sources for electricity and hydrogen production / Granovskii M., Dincer I., Rosen M. A. // Atmos. Environ. — 2007. — Vol. 41, #8. — pp. 1777 — 1783.
2. Nefedov, V.G. Vydelenie gazovoy fazy pri elektrolize vody v polyakh massovykh i elektricheskikh sil. [Selection of gas phase at the electrolysis of water in the fields of mass and electric forces]: Monograph. — Dnipropetrovsk, 2008. — 292 p.
3. Billiter, Zh. Promyshlennyy elektroliz vodnykh rastvorov. [Industrial electrolysis of water solutions]. — Moscow, 1959. — 406 p.
5. Stepanov, A.V. Poluchenie vodoroda i vodorodsoderzhashchikh gazov [Production of hydrogen and hydrogenous gases] — Kyiv, 1982. — 312 p.

Рецензент д-р хим. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Михайленко Г.Г.

Поступила в редакцию 7 октября 2013 г.