

УДК 621.357.12

ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С КОНИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Канд. техн. наук, доц. ИВАШЕЧКИН В. В., канд. хим. наук, доц. МАТВЕЙКО Н. П.

Белорусский национальный технический университет

Известны электролизно-водные генераторы для получения водородно-кислородной газовой смеси (ВКГС) стехиометрического состава 2:1 ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$) методом электролиза щелочных растворов, которые используются для пайки и сварочных работ [1]. Однако в силу конструктивных особенностей они не могут быть использованы в стесненных условиях скважин для регенерации фильтров методом подводного взрыва ВКГС [2].

В БНТУ разработан электролизно-водный газогенератор для получения ВКГС, в котором применяются конические электроды с активными композиционными покрытиями [3]. Представляло интерес исследовать влияние угла наклона электродов к горизонтали, площади газоотводных окон и межэлектродных расстояний на энергетические характеристики электролизера и разработать методику его расчета.

Все исследования проводили на опытном стенде (рис. 1), состоящем из заполненного щелочным раствором капронового цилиндрического корпуса электролизера ($D = 80$ мм и $H = 120$ мм) со съемной крышкой из оргстекла, что позволяло устанавливать внутри две ячейки биполярного типа. Пакет электродов обтягивался полиэтиленовой оболочкой. Газоотводные окна имели форму полукруга. ВКГС направлялась по трубке в эвдиометр для сбора и замера ее количества. На-

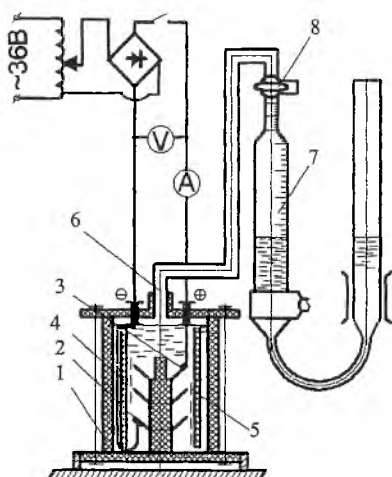


Рис. 1. Схема опытного стенда для исследования газогенераторов: 1 – корпус электролизера; 2 – монополярный электрод – катод; 3 – монополярный электрод – анод; 4 – диэлектрическая оболочка; 5 – газоотводные окна; 6 – трубка; 7 – эвдиометр; 8 – трехходовой кран

пряжение на ячейках регулировалось с помощью автотрансформатора ЛАТР-1М. Силу тока и напряжение измеряли миллиампервольтметрами М2018.

В опытах использовали сменные электродные ячейки с углами наклона соответственно 0; 20; 30; 40; 60°, межэлектродными расстояниями 5; 10; 15; 20 мм, площадями газоотводных окон 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 см². Электроды были изготовлены из стали толщиной 0,3 мм с никелевым гальваническим покрытием, площадь сечения – 27 см² при всех углах наклона электродов. Концентрацию гидроксида калия поддерживали около 20 мас. %.

В ходе опытов измеряли время электролиза T , объем ВКГС V , полученный за это время, силу тока I , напряжение на электролизере U .

Объем ВКГС приводили к нормальным условиям с учетом опытных значений температуры t и давления p по формуле

$$V_0 = \frac{V 273 p}{(273 + t) \cdot 760}. \quad (1)$$

Теоретический объем V_T ВКГС рассчитывали по закону Фарадея

$$V_T = \frac{V_1 I T n}{F}, \quad (2)$$

где V_1 – объем ВКГС, выделяющейся при пропуске через раствор электролита 96480 Кл электричества ($V_1 = 16800$ мл); n – число ячеек электролизера ($n = 2$); F – число Фарадея ($F = 96480$ Кл/моль).

Выход по току определяли по формуле

$$\text{ВТ} = \frac{V_0}{V_T}. \quad (3)$$

Производительность электролизера

$$Q = \frac{V_0}{T}. \quad (4)$$

Удельный расход электроэнергии (Вт·ч на получение 1,5 м³ ВКГС) вычисляли по формуле [4]

$$W_{\text{пр}} = 2390 \frac{U}{\text{ВТ} n}. \quad (5)$$

Коэффициент полезного использования энергии рассчитывали следующим образом:

$$\eta = \frac{W_{\text{пр}}}{W_T} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где W_T – теоретический удельный расход электроэнергии (2950 Вт·ч на 1,5 м³ ВКГС).

Исследования показали, что производительность электролиза увеличивается с ростом плотности тока. При этом повышаются напряжение на электролизере, а также удельные затраты электроэнергии. Поскольку обработку фильтра целесообразно производить в возможно короткий промежуток времени, в данной работе все исследования выполнены при максимальной производительности электролизера, которая обеспечивается при больших плотностях тока (более 100 мА/см²). На рис. 2–4 представлены графики зависимости η , Q , ВТ от угла наклона α , площади газоотводных окон S_0 , величины межэлектродного расстояния l при $U = 2,5$ В на ячейке.

Как видно из рис. 2, с увеличением угла наклона электродов от 0 до 30° происходит рост производительности электролизера на 29 %. При дальнейшем увеличении угла наклона до 40° наблюдается снижение производительности электролизера в среднем на 25 %. Таким образом, максимум производительности достигается при $\alpha = 30^\circ$. Выход по току возрастает на 33 % при увеличении угла наклона от 0 до 30° и практически остается постоянным при его увеличении до 60°.

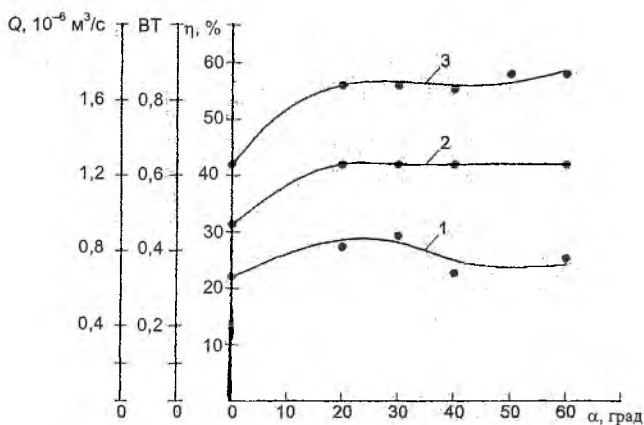


Рис. 2. Зависимость энергетических характеристик электролизера от угла наклона электродов: 1 – $Q = f(\alpha)$; 2 – $\eta = f(\alpha)$; 3 – $ВТ = f(\alpha)$ при $n = 2$, $U = 5$ В, $S = 27$ см²

Коэффициент полезного использования энергии также возрастает на 33 % с увеличением угла наклона от 0 до 30° и далее остается практически постоянным.

Таким образом, наибольший рост указанных характеристик электролиза при высоких плотностях тока (более 100 мА/см²) наблюдался при увеличении угла наклона от 0 до 30°, что можно объяснить улучшением отвода пузырьков из межэлектродного пространства при увеличении угла наклона электродов. В то же время с увеличением угла наклона электродов более 30° наблюдалось повышение межэлектродного расстояния в зоне периферийных участков поверхности электродов вследствие смещения электродов относительно друг друга. Поэтому возрастание основных энергетических параметров электролиза прекращается.

Результаты исследования влияния площади газоотводных отверстий на производительность электролизера, выход по току, коэффициент полезного использования энергии представлены на рис. 3.

Видно, что с увеличением площади окон от 0,2 до 1,0 см² происходит устойчивый рост производительности электролизера на 74 %. Однако выход по току изменяется незначительно и составляет 81–86 %, коэффициент полезного использования энергии практически не изменяется и составляет 40–42 %. Оптимальная площадь газоотводных окон $S_0 = 1$ см² получена для конического электрода площадью $S_s = 27$ см² при плотности тока $I_p = 100$ мА/см².

Отношение площади газоотводных окон S_0 к площади электрода S_s (обозначим через $\varphi = S_0/S_s$ и назовем скважностью электрода) составило 0,037 для электролизера из двух вертикально расположенных ячеек при

оптимальной площади $S_0 = 1 \text{ см}^2$. Очевидно, при большем числе ячеек скважность расположенных выше электродов должна быть больше, поскольку объем ВКГС будет линейно возрастать. Вместе с тем нельзя ожидать линейного увеличения скважности более высоко расположенных электродов, так как с высотой газонаполнение электролита уменьшается из-за укрупнения газовых пузырьков в результате их смешения [4]. Поэтому полученная скважность может быть рекомендована только для трех нижних электродов электролизера. Скважность остальных электродов необходимо подбирать экспериментально.

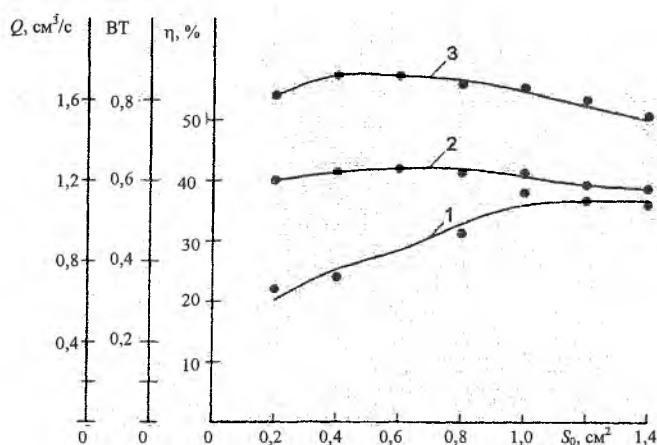


Рис. 3. Зависимость энергетических характеристик электролизера от площади газоотводных окон: 1 – $Q = f(S_0)$; 2 – $\eta = f(S_0)$; 3 – $BT = f(S_0)$ при $n = 2$, $U = 5 \text{ В}$, $\alpha = 30^\circ$

На рис. 4 представлены результаты изучения межэлектродного расстояния l на энергетические характеристики электролизера. Установлено, что при увеличении l от 5 до 20 мм при $U = 5 \text{ В}$ происходит снижение производительности электролизера на 80 %, выход по току падает в диапазоне 86,5–77 %, а коэффициент полезного использования энергии снижается с 42,7 до 38 %.

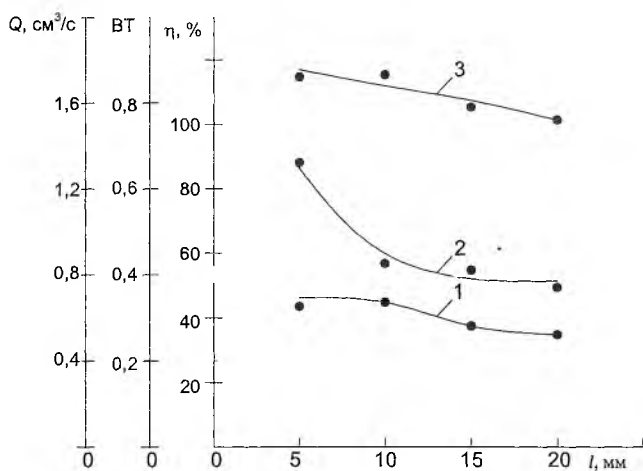


Рис. 4. Зависимость энергетических характеристик электролизера от межэлектродного расстояния: 1 – $Q = f(l)$; 2 – $\eta = f(l)$; 3 – $BT = f(l)$ при $U = 5 \text{ В}$, $S_0 = 1 \text{ см}^2$, $\alpha = 30^\circ$

Снижение энергетических характеристик электролизера при увеличении межэлектродного расстояния обусловлено омическими потерями в электролите, однако использование межэлектродных расстояний менее 5 мм нецелесообразно, так как сокращается общий объем электролита, увеличивается его газонаполнение, что приводит к росту удельных энергозатрат и снижению производительности.

Сравнительные испытания применения едкого кали и едкого натра показали, что первый при прочих равных условиях обладает меньшим газонаполнением, а наилучшая его электропроводность достигается при концентрации 30 %.

Положительным фактором электролиза в скважине является избыточное гидростатическое давление, так как с ростом давления из-за снижения газонаполнения производительность электролизера увеличивается, а расход электрической энергии уменьшается. Рост давления электролиза позволяет повысить рабочую температуру и снизить энергозатраты.

Таким образом, проведенные исследования позволяют предложить методику расчета биполярного электролизера с коническими электродами с заданной производительностью по ВКГС, необходимой для оперативной очистки фильтров скважин. Объем ВКГС, приведенный к нормальным условиям, выделяющийся в электролизере, согласно закону Фарадея, определяем по выражению [4]

$$V_0 = 174,6 \cdot 10^{-9} I_{\text{я}} n B T T, \text{ м}^3, \quad (7)$$

где $I_{\text{я}}$, А; T , с.

Производительность электролизера Q по ВКГС с учетом (4)

$$Q = 174,6 \cdot 10^{-9} I_{\text{я}} n B T, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (8)$$

Сила тока ячейки равна

$$I_{\text{я}} = I_{\text{р}} S_3, \text{ А}, \quad (9)$$

где $I_{\text{р}}$, А/м²; S_3 , м².

Площадь электрода конической формы определяем как площадь усеченного конуса с радиусами оснований R_1 и R_2

$$S_3 = \frac{\pi(R_1^2 - R_2^2)}{\cos \alpha}. \quad (10)$$

Объединив выражения (8)–(10), определим необходимое число ячеек электролизера n для обеспечения его заданной производительности Q

$$n = \frac{5727 \cdot 10^3 Q \cos \alpha}{\pi I_{\text{р}} (R_1^2 - R_2^2) B T}. \quad (11)$$

Задавая значения α , ВТ, R_1 , R_2 , $I_{\text{р}}$ (в зависимости от вида поверхности электродов), по формуле (11) определяем необходимое число ячеек электролизера с нужной производительностью Q .

Общее напряжение U на электролизере рассчитаем по формуле

$$U = U_{\text{я}} n,$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение на ячейке.

Напряжение на ячейке $U_{\text{я}}$ определяем по известной формуле

$$U_{\text{я}} = U_{\text{р}} + \eta_{\text{а}} + \eta_{\text{к}} + \Delta U_{\text{з}},$$

где $U_{\text{р}}$ – теоретическое значение напряжения разложения воды, $U_{\text{р}} = 1,23$ В; $\eta_{\text{к}}$, $\eta_{\text{а}}$ – перенапряжение выделения водорода и кислорода на катоде и аноде при заданной плотности тока $I_{\text{р}}$; $\Delta U_{\text{з}}$ – падение напряжения в растворе.

Для приближенных расчетов $U_{\text{я}} = 2,5\text{--}3$ В.

Подключение пакета электродов может быть одно- и двухбатарейным.

Однобатарейная схема подключения. Полюса источника постоянного тока подключены к крайним электродам электролизера, сила тока во всех ячейках постоянна и равна $I = I_{\text{я}}$, а общее напряжение на электролизере $U = nU_{\text{я}}$.

Двухбатарейная схема подключения. Центральный электрод подключен к «плюсу» источника тока, а крайние электроды – к «минусу». Эта схема позволяет подключать батареи параллельно, что обеспечивает упрощенную изоляцию центрального электрода (анода) от корпуса. Корпус одновременно является катодом. Удастся разместить две батареи в одном корпусе без усложнения конструкции.

При этой схеме подключения сила тока на электролизере $I = I_1 + I_2$, т. е. общий ток равен сумме токов двух батарей. При использовании батарей с одинаковыми геометрическими параметрами общий ток на электролизере $I \approx 2I_{\text{я}}$. Общее напряжение на газогенераторе $U = nU_{\text{я}}$, что позволяет использовать такое же по величине безопасное напряжение, как и в однобатарейной конструкции. Общая сила тока и производительность газогенератора возрастают вдвое. Применяемое на практике напряжение на газогенераторе не превышает 85–90 В, а сила тока – 40–50 А.

Геометрические характеристики электролизера – высоту и диаметр – рассчитываем с учетом диаметра фильтров обрабатываемых скважин, количества электродов и межэлектродного расстояния, причем один электролизер может быть универсальным для нескольких типоразмеров скважин.

Высоту внутренней полости электролизера находим по формуле

$$H = nl + (n + 1)\delta + 2R_t \text{tg} \alpha + \Delta H,$$

где δ – толщина электродов; ΔH – высотный запас воды на разложение и испарение.

Затраты воды G на разложение составляют 0,805 кг на получение 1,5 м³ ВКГС [4]. Испарение можно учесть, если ввести пятипроцентный запас на величину G .

Время электролиза T , с, необходимое для накопления и сжигания в зоне очищаемого фильтра расчетного количества энергоносителя V_0 , м³, можно определить по выражению (7)

$$T = \frac{5727 \cdot 10^3 V_0}{I_{\text{я}} n B T}.$$

Пример. Рассчитать электролизер при следующих исходных данных: $Q = 9$ дм³/мин = $1,5 \cdot 10^{-4}$ м³/с; $R_1 = 0,09$ м; $R_2 = 0,01$ м; материал электро-

дов – сталь с никелевым покрытием ($I_p = 100 \text{ мА/см}^2 = 1,0 \text{ кА/м}^2$), схема подключения – двухбатарейная.

Расчет

1. Определяем площадь электрода при оптимальном угле наклона 30°

$$S_3 = \pi(R_1^2 - R_2^2) / \cos \alpha = 3,14 \cdot (0,09^2 - 0,01^2) / 0,866 = 0,029 \text{ м}^2.$$

2. Определяем силу тока ячейки

$$I_{\text{я}} = I_p S_3 = 1000 \cdot 0,029 = 29 \text{ А}.$$

3. Общее количество работающих ячеек электролизера

$$n = \frac{Q \cos \alpha \cdot 5727 \cdot 10^3}{\pi I_p (R_1^2 - R_2^2) \text{ ВТ}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,866 \cdot 5727 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 1000 \cdot (0,09^2 - 0,01^2) \cdot 0,88} = 34.$$

4. Количество ячеек n_1 в одной батарее

$$n_1 = n/2 = 17.$$

5. Сила тока на электролизере

$$I = 2I_{\text{я}} = 29 \cdot 2 = 58 \text{ А}.$$

6. Напряжение на электролизере U из расчета $U_{\text{я}} = 2,5 \text{ В}$

$$U = nU_{\text{я}} = 17 \cdot 2,5 = 42,5 \text{ В}.$$

ВЫВОДЫ

1. На основе экспериментальных исследований электролизно-водного газогенератора ВКГС с коническими электродами при плотностях тока более 100 мА/см^2 установлены его оптимальные параметры: угол наклона электродов к горизонтали – 30° , межэлектродное расстояние – 5 мм , концентрация КОН – 30% при выходе по току $\text{ВТ} = 0,85\text{--}0,88$ и $\eta = 42\text{--}43 \%$.

2. Предложена методика расчета электролизно-водных газогенераторов. Рассмотрен пример.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В. И., Алейников С. Л. Повышение эффективности работы электролизно-водных генераторов // Автоматическая сварка. – 1978. – № 11. – С. 70–71.
2. Ивашечкин В. В. Расчет энергозатрат при газоимпульсной регенерации фильтров водозаборных скважин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 1. – С. 77–86.
3. Снижение энергозатрат получения гремучего газа при импульсной регенерации фильтров / В. В. Ивашечкин, Н. П. Матвейко, Б. В. Сабадах, Д. А. Козлов; БПИ. – Мн., 1987. – 16 с. – Деп. в ЦЕНТИ Минводхоза СССР.
4. Якименко Л. М. Электрохимические процессы в химической промышленности: Производство водорода, кислорода, хлора и щелочей. – М.: Химия, 1981. – 280 с.

Представлена кафедрой
гидравлики

Поступила 20.04.2005