

УДК 620.92

**ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА  
ЭЛЕКТРОЛИЗОМ ВОДЫ  
TECHNOLOGIES OF HYDROGEN PRODUCTION BY WATER  
ELECTROLYSIS**

Р.С. Игнатович

Научный руководитель – В.А. Седнин, д.т.н., профессор  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
vsednin@bntu.by

R. Ignatovich

Supervisor – V. Sednin, Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of Department  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** В данной работе представлен обзор существующих технологий получения водорода путем электролиза воды. Также в работе представлена таблица сравнительных характеристик описанных методов электролиза.*

***Abstract:** This paper presents an overview of existing technologies for producing hydrogen by electrolysis of water. The paper also presents a table of comparative characteristics of the described methods of electrolysis.*

***Ключевые слова:** энергетика, электролиз, водород, щелочной электролиз, электролиз твердых оксидов.*

***Keywords:** energy, electrolysis, hydrogen, alkaline electrolysis, solid oxide electrolysis.*

### **Введение**

На сегодняшний день водородной энергетике оказывается серьезное внимание. Так, например, в Европейском Союзе значительная доля электрической энергии вырабатывается на альтернативных источниках энергии, которые отличаются нестабильностью выработки. Одним из основных вариантов решения данной проблемы является накопление избыточной энергии, путем разложения воды в электролизере, с последующим хранением или транспортировкой в форме водорода. В Республике Беларусь избыточная электрическая энергия появится после пуска Белорусской атомной электростанции, в часы провалов потребления энергии. По этой причине глубокое изучение технологий осуществления электролиза является важным вопросом как в мире, так и в нашей республике.

### **Основная часть**

На сегодняшний день известно три различных технологии осуществления электролиза:

1. Щелочной электролиз (AEL);
2. Электролиз воды на протонообменной мембране (PEM);
3. Электролиз твердых оксидов (SOEC).

На рисунке 1 схематично представлен принцип действия щелочного электролизера.

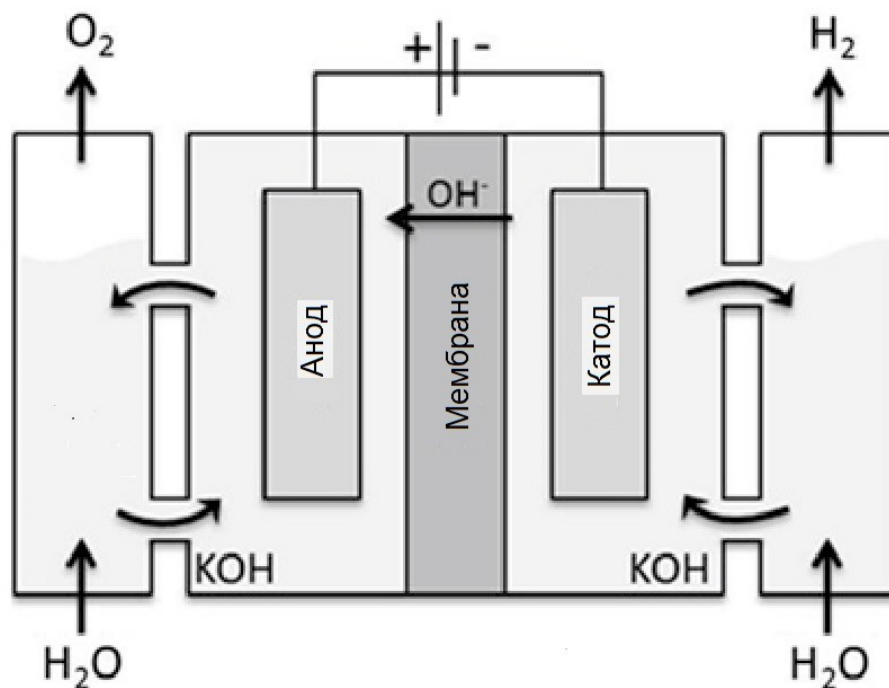


Рисунок 1 – Принцип действия щелочного электролизера [1]

Щелочные электролизеры представляют собой наиболее развитую и популярную на сегодняшний день технологию электролиза воды, которая использует водный щелочной раствор в качестве электролита. Как показано на рисунке 1, ячейка щелочного электролизера состоит из двух электродов, которые полностью погружены в 20 – 40 процентный массовый водный раствор гидроксида калия (щелочной раствор необходим потому, что чистая вода плохо проводит электрический ток). Между катодом и анодом располагается полупроницаемая мембрана. Электроды обычно изготавливаются из никеля или никелированной стали. KOH предпочтительнее электролитов гидроксида натрия (NaOH) из-за его более высокой проводимости [1].

При пропускании постоянного электрического тока через электроды происходит разложение воды на ионы водорода  $H^+$  и гидроксильные ионы  $OH^-$ . Ионы водорода передвигаются к катоду, где отдают свой заряд, превращаясь в атомы водорода, соединяющиеся в молекулы; в результате этого на катоде выделяется газообразный водород. Ионы гидроксила отдают свой заряд на аноде и соединяются друг с другом с образованием воды и кислорода [2].

Технология доступна в продаже по цене около 1000 евро/кВт, но время запуска электролиза после его отключения составляет от 30 до 60 минут, что делает ее менее подходящей для работы с прерывистым питанием и частыми пусками и остановками [3]. В некоторых случаях необходимость работать в постоянном режиме может послужить существенным недостатком.

Электролиз воды на протонообменной мембране представляет собой вторую по значимости технологию электролиза воды. Она новее чем щелочной электролиз и применяется на практике, но, как правило, для небольших установок. К технологии на сегодняшний день повышенный интерес, так как она об-

ладает лучшей характеристикой пуска и остановки, чем щелочной электролиз [3]. Принципиальная схема электролиза воды на протонообменной мембране представлена на рисунке 2.

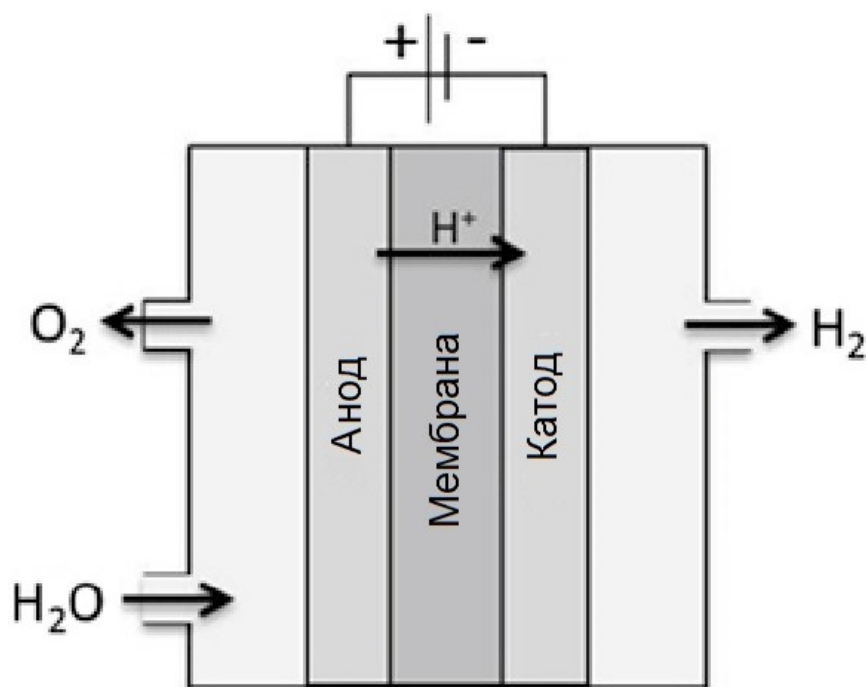


Рисунок 2 – Принцип действия электролиза воды на протонообменной мембране [1]

На анод поступает деионизированная вода, где расщепляется на протоны, электроны и газообразный кислород:  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ . Протоны проходят через мембрану, а электроны движутся через внешнюю электрическую цепь. На катоде протоны и электроны воссоединяются, образуя газообразный водород:  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$  [4].

Нарастающая тенденция роста интереса к технологиям электролиза воды и потребность при этом снижать потребление электрической энергии стали причинами появления нового способа электролиза воды: электролиза твердых оксидов. Принципиальная схема электролиза твердых оксидов приведена на рисунке 3. В ячейках электролизера в качестве электролита используется тонкий, плотный твердый оксидный слой, который становится проводящим для ионов (обычно кислорода) при повышенных температурах. С обеих сторон такого электролита непосредственно прикреплены пористые электродные слои, к которым примыкают токосъемники. Вода (пар) обычно подается со стороны катода, где происходит реакция восстановления:  $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$ .

Образующиеся ионы кислорода мигрируют на анодную сторону, где происходит реакция:  $\text{O}^{2-} \rightarrow 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$  [1].

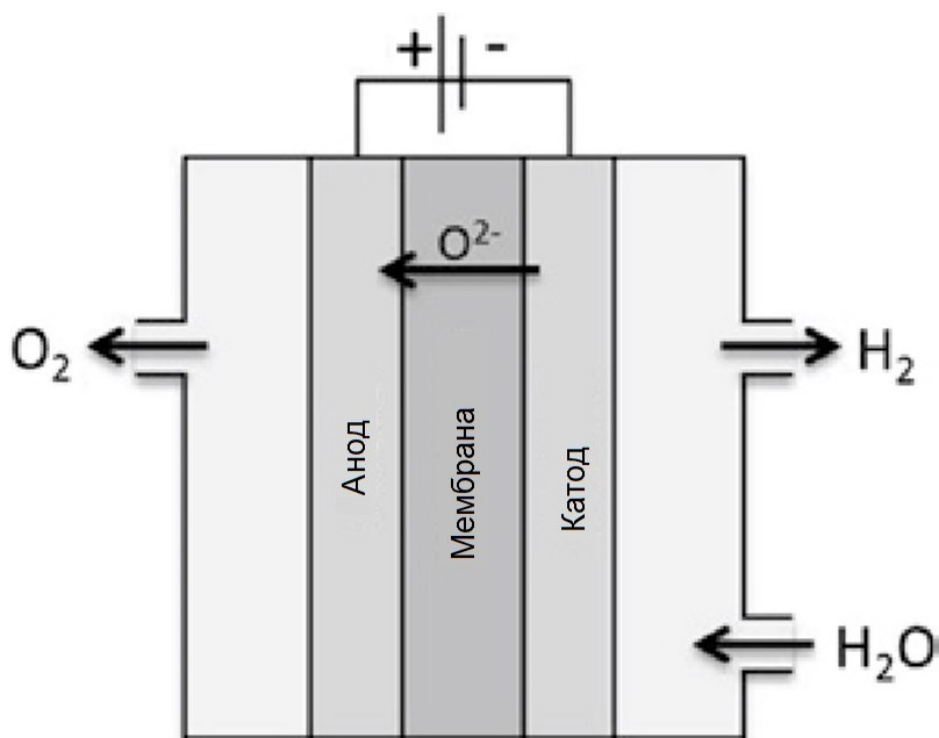


Рисунок 3 – Принцип действия электролиза твердых оксидов [1]

Ожидается, что данная технология будет обладать самыми лучшими характеристиками пуска и остановки, будет иметь более высокую электрическую эффективность (самое низкое потребление электрической энергии), будет иметь низкую стоимость материалов и будет иметь возможность работать в обратном направлении, но она все еще находится на стадии лабораторного исследования [3].

В результате всего вышесказанного, в таблице 1 представлены сравнительные характеристики трех методов электролиза воды.

Таблица 1 – Сравнение показателей технологий электролизных установок

Сравнительная характеристика	Щелочной электролиз	Электролиз воды на протонообменной мембране	Электролиз твердых оксидов
Ионы электролита	ОН <sup>-</sup>	Н <sup>+</sup>	О <sup>2-</sup>
Напряжение ячейки, В	1,9 – 2,4	1,6 – 2	1,2 – 1,3
Плотность электрического потока, А/см <sup>2</sup>	0,3 – 0,5	1 – 2	0,3 – 0,6
Рабочая температура, °С	70 – 90	60 – 80	700 – 1000
Эффективность, %	60 – 80	65 – 80	Не изучено

Окончание таблицы 1

Удельное потребление ЭЭ (кВт/нм <sup>3</sup> )	> 4.6		> 4.8	< 3.2	
Рабочее давление, бар	1	чаще всего	30 – 60	1	чаще всего
	15	при повышенном давлении		25	при повышенном давлении
Стоимость, евро/кВт	1000		2000	Не определена	
Чистота водорода, %	99,5 +		99,9 +	99,9 +	
Время запуска	30 – 60 мин		100 мс	100 мс	

Стоит отметить, что альтернативным методом получения водорода, обладающим таким же потреблением воды, является преобразование природного газа путем воздействия на него пара (паровая конверсия). В условиях Республики Беларусь данный метод не имеет права на существование, так как природный газ является импортируемым топливом, долю которого в приходной части энергобаланса страны пытаются сокращать.

### Заключение

На основе всего вышесказанного можно сделать вывод, что универсальной технологии для осуществления электролиза воды нет. Выбор типа электролизера индивидуален для каждого конкретного случая. Так, если производство водорода будет осуществляться в непрерывном режиме, то целесообразнее использовать более дешевый щелочной электролизер, а при работе в переменном режиме больше подойдет электролизер с протонообменной мембраной, имеющий время запуска 100 мс. Чистота получаемого водорода и эффективность преобразования электрической энергии в водород в них примерно одинакова. Однако ситуация может существенно измениться в случае, если испытания электролизеров, основанных на твердых оксидах, окажутся успешными, а стоимость полученного водорода будет сопоставима с имеющимися.

### Литература

1. Markus Lehner, Robert Tichler, Horst Steinmüller, Markus Koppe. Power-to-Gas: Technology and Business Models. SpringerBriefs in Energy. 2014.
2. Генераторы водорода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gasonsru.ru/hydrogen-electrolysis>. – Дата доступа: [08.04.2021].
3. Martin Lambert. Power-to-Gas: Linking Electricity and Gas in a Decarbonising World? Oxford Energy Insight: 39, October 2018.
4. Водород – PEM [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: [<https://gasonsru.ru/hydrogen-pem>]. – Дата доступа: [08.04.2020].