

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Гуськова Маргарита Игоревна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование процессов релаксации ЭДС в водородно - кислородном  
топливном элементе**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18309

**Научный руководитель:**

д.ф.- м.н., в.н.с. Шмаков А. Н.  
Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» декабря\_\_\_\_\_ 2019 г.

**Преподаватель практикума**

доцент Костюрина А. Г.  
Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» декабря\_\_\_\_\_ 2019 г.

**Куратор практикума:**

к. т. н. доцент Астрелин В. Т.  
Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» декабря\_\_\_\_\_ 2019 г.

Новосибирск, 2019 г.

## Аннотация

В данной работе представлены теоретические основы принципов работы различных химических источников тока, таких как гальванический элемент, аккумулятор и топливный элемент, и проведены измерения некоторых характерных параметров. Так, для водородного топливного элемента с дистиллированной водой в качестве электролита и платиновыми электродами была получена зависимость ЭДС от времени и измерено время релаксации ЭДС ( $\tau$ ) для двух значений расстояния между электродами. Экспериментально полученные значения составляют:  $\tau = 110$  с (при  $d = 4$  см) и  $\tau = 148$  с ( $d = 2$  см). Объяснено увеличение времени релаксации при уменьшении расстояния между электродами. Так же в данной работе проведено измерение вольт-амперной характеристики среднетемпературного кислородно-водородного топливного элемента при различных скоростях потока водорода ( $H_2$ ), рассчитана максимальная мощность топливного элемента и определены условия ее существования.

Ключевые слова: химические источники тока, время релаксации, вольт – амперная характеристика, мощность.

## Содержание

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                       | 3  |
| Теоретическая часть.....                                                                            | 4  |
| Гальванический элемент. ....                                                                        | 4  |
| Аккумуляторы. ....                                                                                  | 6  |
| Топливные элементы. ....                                                                            | 7  |
| Экспериментальная часть.....                                                                        | 8  |
| Исследование процесса релаксации ЭДС.....                                                           | 8  |
| Исследование характеристик среднетемпературного кислород - водородного<br>топливного элемента ..... | 10 |
| Анализ погрешностей .....                                                                           | 14 |
| Вывод.....                                                                                          | 15 |
| Приложение .....                                                                                    | 16 |
| Список литературы .....                                                                             | 17 |

## Введение

В настоящее время химические источники тока получили чрезвычайно широкое распространение как локальные, мобильные, компактные, эффективные и надежные источники электрической энергии. Это щелочные и кислотные аккумуляторы различного значения, литий-ионные аккумуляторы в мобильных телефонах, батарейки в фонариках, топливные элементы, которые уже используются в некоторых автомобилях или промышленных установках. Химическая энергия реагентов в топливном элементе преобразуется в электрическую энергию прямо в процессе химической реакции, обеспечивая существенно больший выход, чем при обычном сгорании.

Топливные элементы (ТЭ) энергетически более эффективны, чем двигатели внутреннего сгорания, поскольку для ТЭ нет термодинамического ограничения коэффициента использования энергии. Коэффициент полезного действия (КПД) топливных элементов достигает 70%, в то время как КПД двигателей внутреннего сгорания составляет около 13%, а КПД паротурбинных энергетических установок не превышает 40%. При использовании тепла и воды эффективность топливных элементов еще более увеличивается.

Важное преимущество ТЭ – их экологичность. Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, при их эксплуатации очень низки.

Преимуществами ТЭ являются также доступность топлива, надежность – в топливном элементе отсутствуют движущиеся части, долговечность и простота эксплуатации.

Изучение различных путей преобразования химической энергии в электрическую является целью данной работы.

## Теоретическая часть

Проводники электрического тока могут быть классифицированы на две группы по типу носителей заряда: проводники первого рода, ток в которых создается за счет электронов (яркие представители – металлы и полупроводники) и проводники второго рода, в которых ток переносят ионы (растворы и расплавы электролитов).

Электродом называется проводник первого рода, соприкасающийся с проводником второго рода.

Электрохимические процессы относятся к окислительно - восстановительным химическим реакциям (ОВР). В них происходит переход электронов от одних атомов либо ионов к другим, при этом химическая энергия превращается в тепловую. Электрод, на котором идет восстановление, называется катодом, электрод, на котором идет окисление – анодом.

### Гальванический элемент

Гальваническим элементом называется прибор, в котором окисление и восстановление пространственно разделены и переход электронов осуществляется через внешнюю цепь между анодом и катодом. Таким образом, энергия химической реакции преобразовывается в электрическую.

Принцип работы гальванического элемента напрямую связан со свойствами металла. При введении металла в раствор, содержащий одноименные ионы, происходит замена некоторыми из этих ионов исходных, находящихся в узлах кристаллической решетки металла. В зависимости от концентрации раствора, возможно два пути протекания дальнейшей реакции. При малой концентрации ионов в растворе происходит переход ионов из кристаллической решетки металла в раствор, при значительной концентрации – обратный процесс. В первом случае на металле индуцируется отрицательный заряд, во втором – положительный. Оба процесса прекращаются при установлении динамического

равновесия. Для того чтобы скомпенсировать заряд металла, к его поверхности притягиваются ионы противоположного знака, создавая своеобразный конденсатор – двойной ионный слой. При этом между этими слоями возникает разность электрических потенциалов. При выборе начала отсчета потенциала на глубине раствора, - разность потенциалов называют электродным потенциалом. Эта разность не зависит от абсолютного значения потенциала в точке отсчета. Следовательно, необходимым требованием является наличие общей точки отсчета, то есть электролитического контакта. Электроны, участвующие в этом процессе, могут переходить между электродами только по замкнутой внешней цепи (электроны движутся от точки с меньшим потенциалом, в точку с большим). Значит, причиной протекания ОВР в гальваническом элементе является наличие разности электродных потенциалов. Потенциал каждого электрода зависит от природы металла, концентрации его ионов в растворе и температуры.

В гальваническом элементе существует четыре границы возникновения разности потенциала: между первым металлом и раствором его соли возникает электродный потенциал ( $U_1$ ); между вторым металлом и раствором его соли возникает еще один электродный потенциал ( $U_2$ ); на границе между двумя растворами возникает диффузный потенциал, вызванный различием в подвижности ионов, который можно устранить добавлением электролита между растворами, имеющего у обоих ионов одинаковую подвижность, чаще всего используют насыщенный раствор хлорида калия (солевой мостик); на границе между двумя металлами из-за перехода электронов, возникает контактный потенциал, но его значение учитывается при определении электродного потенциала. Таким образом, электродвижущая сила (ЭДС) гальванического элемента равна разности электродных потенциалов:  $\text{ЭДС} = U_{\text{катода}} - U_{\text{анода}}$ , причем  $U_{\text{катода}} > U_{\text{анода}}$ , то есть катодом является электрод, имеющий большее значение электродного потенциала, а анодом меньшее.

## Аккумуляторы

Аккумулятор – источник тока, принцип действия которого основан на явлении электролиза.

Электролиз можно рассматривать как вынужденную ОВР, так как мы заставляем систему совершать химическое превращение, пропуская через нее электрический ток. Следовательно, физико-химическая сущность процессов, протекающих при электролизе, аналогична той, на которой основан принцип действия гальванического элемента, но в первом случае ток вызывает химическую реакцию, а во втором случае ток – следствие химической реакции.

Основным элементом конструкции аккумулятора являются электроды, соединенные с полюсами источника постоянного электрического тока. Так же как и в ГЭ, катодные процессы носят восстановительный характер, а анодные – окислительный. Для того чтобы на катоде мог идти процесс восстановления, а на аноде – процесс окисления, первый присоединяют к отрицательному полюсу, а второй – к положительному полюсу источника.

Основная особенность аккумулятора заключается в обратимости внутренних химических процессов, что обеспечивает его многократное циклическое использование. Рассмотрим причины обратимости ОВР.

Как было указано выше, электроны движутся от точки с меньшим потенциалом в точку с большим. Значит, при известных величинах электродных потенциалов, - можно определить в каком направлении должна протекать ОВР. Варьируя пары металлов, являющиеся материалом электродов, можно заставить реакцию протекать в обе стороны.

Полностью разрядив аккумулятор в первый раз, с помощью внешнего источника ЭДС прошедшую в нем реакцию можно запустить в обратном направлении. Это восстановит исходное состояние, так что после перезарядки батарею можно будет использовать вновь.

Важно заметить, что электрод представляет собой сложную многокомпонентную систему, и при пропускании тока через него можно ожидать участия в реакции каждого из составляющих его веществ. Поэтому при электролизе могут происходить одновременно разнообразные процессы, как электродные полуреакции, так и вторичные химические превращения частиц, образующихся на электроде, при их взаимодействии с растворителем или материалом электрода.

Наиболее распространенными типами аккумуляторов являются свинцово-кислотные (или просто свинцовые) аккумуляторы, в основе действия которых лежит реакция окисления-восстановления свинца. Еще более популярными в последнее время являются литий-ионные аккумуляторы, основанные на реакции окисления-восстановления лития.

## Топливные элементы

Топливный элемент – электрохимическое устройство, подобное гальваническому элементу, но отличающееся от него тем, что вещества для электрохимической реакции подаются в него извне – в отличие от ограниченного количества энергии, запасённого в гальваническом элементе или аккумуляторе.

Наиболее пригодное вещество такого типа – газообразный водород. Его окисление кислородом воздуха с образованием воды (по реакции  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ) является простейшей окислительно-восстановительной реакцией, а перенос электронов между ионами тоже можно использовать в качестве источника тока. Протекающая при этом реакция является в какой-то степени обратной к реакции электролиза воды.

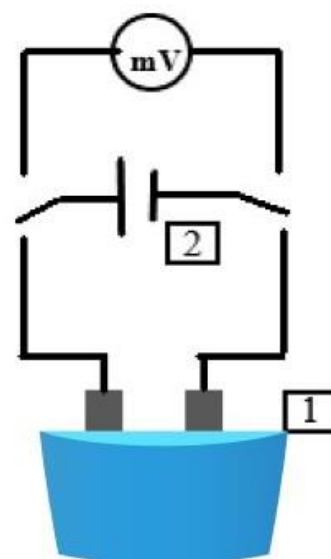
Схема работающего водородного топливного элемента очень похожа на схему химического источника тока, но содержит в себе дополнительные каналы для подачи топлива и окислителя и отвода продуктов реакции, избытка поданных газов. Электроды в таком элементе представлены в виде пористых проводящих катализаторов. К аноду подводится газообразное топливо (водород), а к катоду – окислитель (кислород из воздуха), и на границе каждого из

электродов с электролитом проходит своя полуреакция (окисление водорода и восстановление кислорода соответственно). В то же самое время, в зависимости от типа топливного элемента и типа электролита, самообразование воды может проходить как вблизи анода, так и вблизи катода.

## Экспериментальная часть

### Исследование процесса релаксации ЭДС

Экспериментальная установка представляет собой простейший топливный элемент (рис. 1): две платиновые пластины (1), закрепленные на определенном расстоянии  $d$  и расположенные параллельно друг другу, погружены в емкость с дистиллированной водой на  $2/3$  своей площади. В данной работе измерения проведены при двух расстояниях  $d = 4$  и  $d = 2$  см. К каждой из двух пластин подведены соединительные провода. В начальный момент концы



проводов подключаются к элементу питания (2) Рис. 1. Схема установки (напряжение 9 В) и в течение нескольких минут происходит электролиз воды и образование некоторого количества кислорода и водорода вблизи пластин. Тем самым, мы выводим систему из состояния равновесия. Далее, отсоединяем провода от батарейки, к этому моменту напряжение на электродах составляет около 1 В, и с соблюдением полярности подключаем их к измерительному прибору, позволяющему фиксировать измерение ЭДС (в данной работе был использован мультиметр). То есть, исключая внешнее воздействие, можно измерить время, за которое система вернется в исходное состояние (процесс релаксации). На рисунке 2 приведен график релаксации ЭДС в зависимости от времени.

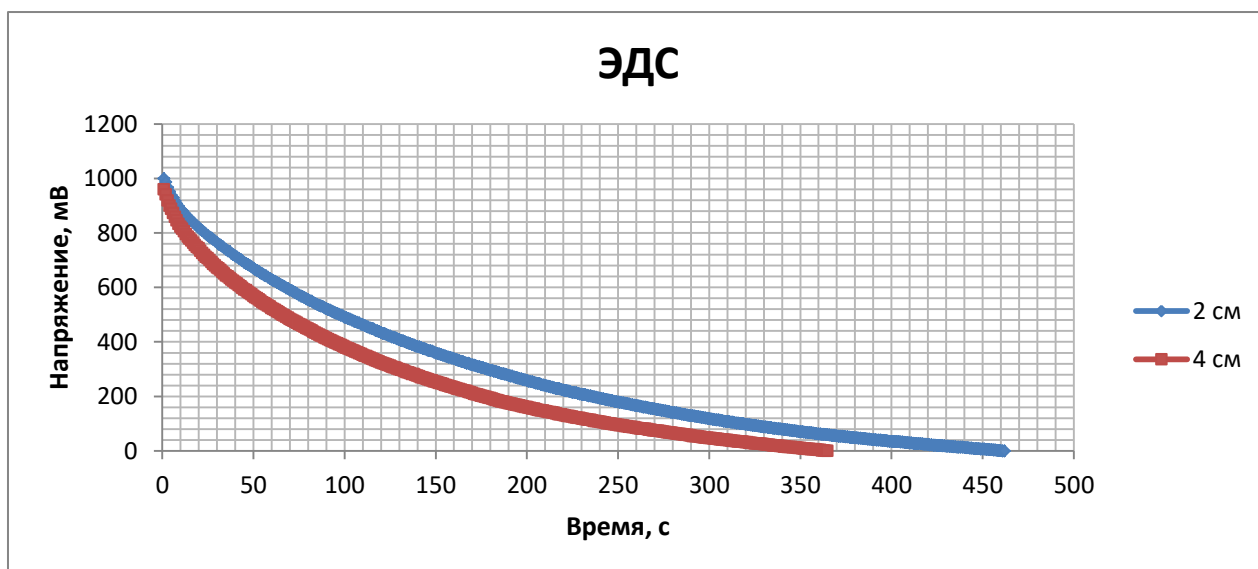


Рис. 2. График зависимости амплитуды напряжения от времени

Из графиков видно, что зависимость ЭДС ТЭ от времени носит экспоненциальный характер. Следовательно, время релаксации можно определить как время, за которое амплитудное значение напряжение уменьшается в  $e$  раз. В данном эксперименте методом аппроксимации экспериментальных данных экспоненциальной функцией было получено:  $\tau = 110$  с (при  $d = 4$  см) и  $\tau = 148$  с ( $d = 2$  см). Для удобства и большей наглядности ниже приведены те же графики (рис. 3), но в логарифмических координатах по оси ординат.

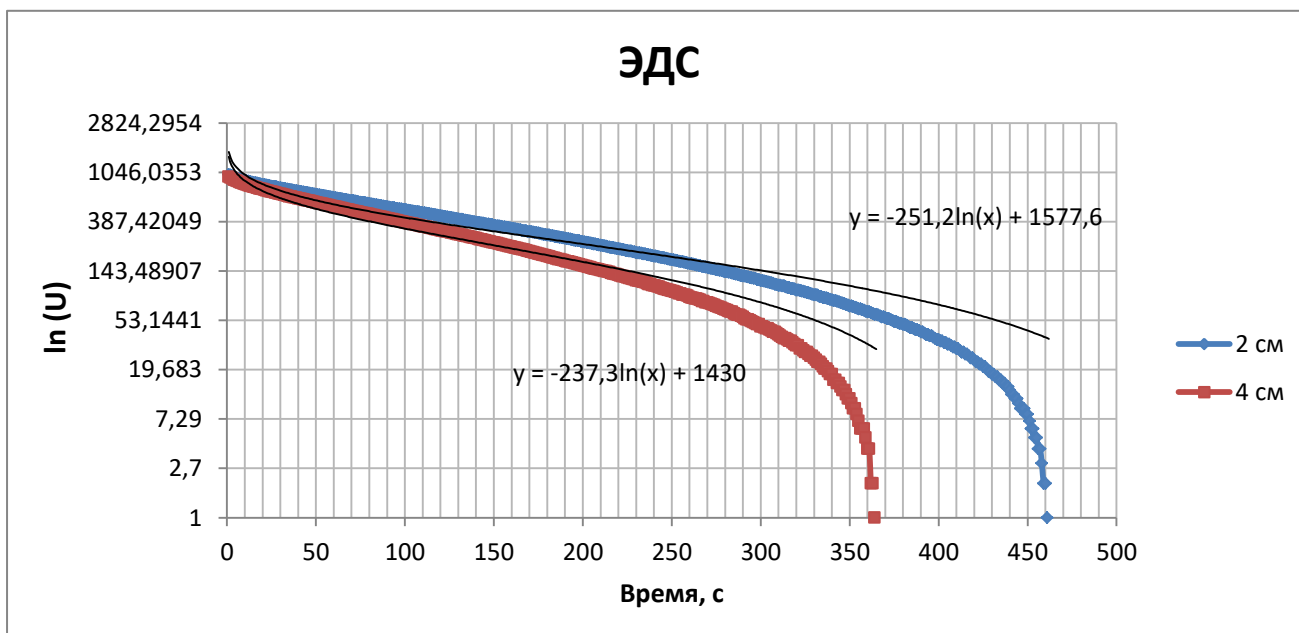


Рис. 3. График зависимости логарифма амплитуды напряжения от времени

Время релаксации ЭДС в ТЭ зависит от расстояния между электродами. Это явление может быть объяснено следующим образом. Скорость реакции

окисления-восстановления в растворе, насыщенном возникшими в процессе электролиза ионами кислорода и водорода, определяется диффузией реагентов – движением их в направлении электродов и рекомбинацией на них с образованием ЭДС, а также объемной рекомбинацией. При малом расстоянии между электродами потери ионов водорода и кислорода в растворе вследствие объемной рекомбинации меньше, и основное количество образовавшихся в результате электролиза зарядов рекомбинирует на электродах. В случае большого расстояния между электродами процесс объемной рекомбинации становится существенным, и, соответственно, время релаксации уменьшается.

### Исследование характеристик среднетемпературного кислород-водородного топливного элемента

В данном эксперименте были измерены вольт-амперные характеристики среднетемпературного водород – кислородного твердооксидного топливного элемента. Схема установки представлена на рис. 4.

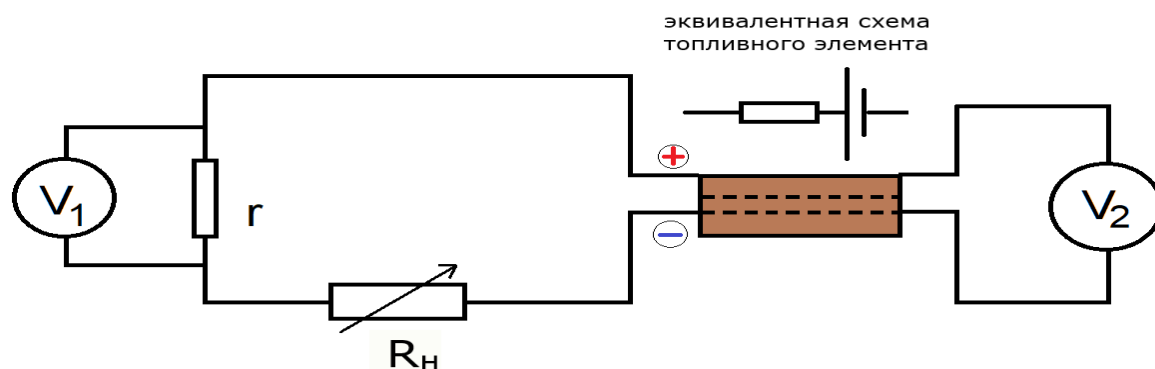


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Топливный элемент состоит из цилиндрической трубки из кислород-проводящей оксидной керамики, покрытой с внутренней стороны пористым катализатором специального состава (рис. 5). Материал кислород-проводящей керамической трубки имеет сложную химическую композицию с атомной структурой, близкой к структуре минерала перовскита  $CaTiO_3$  и обладает при высоких температурах смешанной электрон-ионной проводимостью – т.е. мо-

жет быть как кислородным, так и водородным (протонным) проводником. Керамическая трубка является специфической мембраной, которая пропускает из окружающей атмосферы в объём топливного элемента только кислород и препятствует проникновению в зону реакции других газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  и др.).

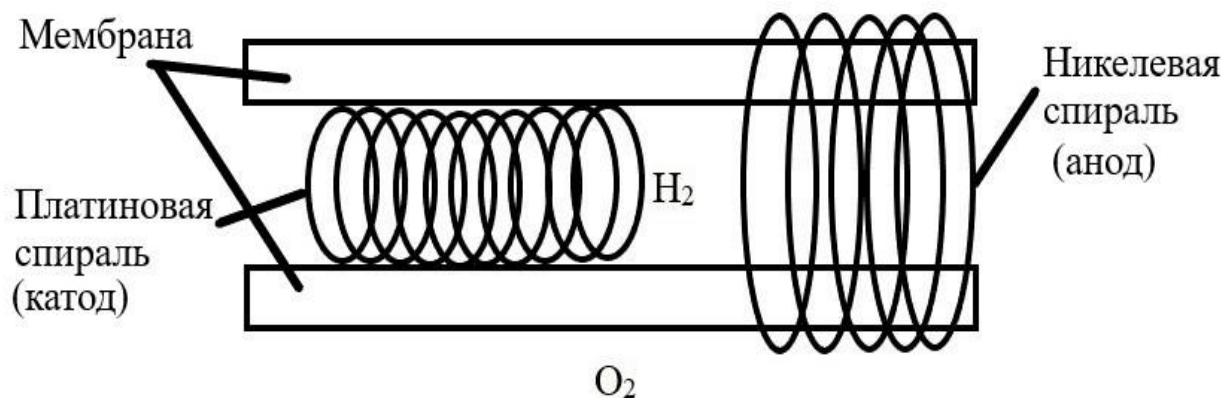


Рис. 5. Схема устройства топливного элемента (в разрезе)

Рабочая температура топливного элемента 850 °С. Во внутреннем объеме трубки расположен платиновый электрод, находящийся в контакте с поверхностью трубки. Внутри трубки подается поток водорода, ионы кислорода сепарируются из воздуха и диффундируют через проводящую керамику к внутренней поверхности трубки, где на нанесенном на анод катализаторе происходит реакция окисления водорода. Реакция, происходящая на аноде, может быть записана формулой:  $2\text{H}_2 + 2\text{O}_2^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4e^-$ , а на катоде:  $\text{O}_2 + 4e^- \rightarrow 2\text{O}_2^-$ .

На катализаторе анода молекулярный водород диссоциирует и теряет электроны. Катионы водорода (протоны) проходятся через керамическую мембрану к катоду, а электроны отдаются во внешнюю цепь. ЭДС возникает между внешней и внутренней поверхностью керамической трубки, к которым подведены никелевый и платиновый электроды. На рисунке 6 представлены вольт-амперные характеристики для разной скорости потока водорода.

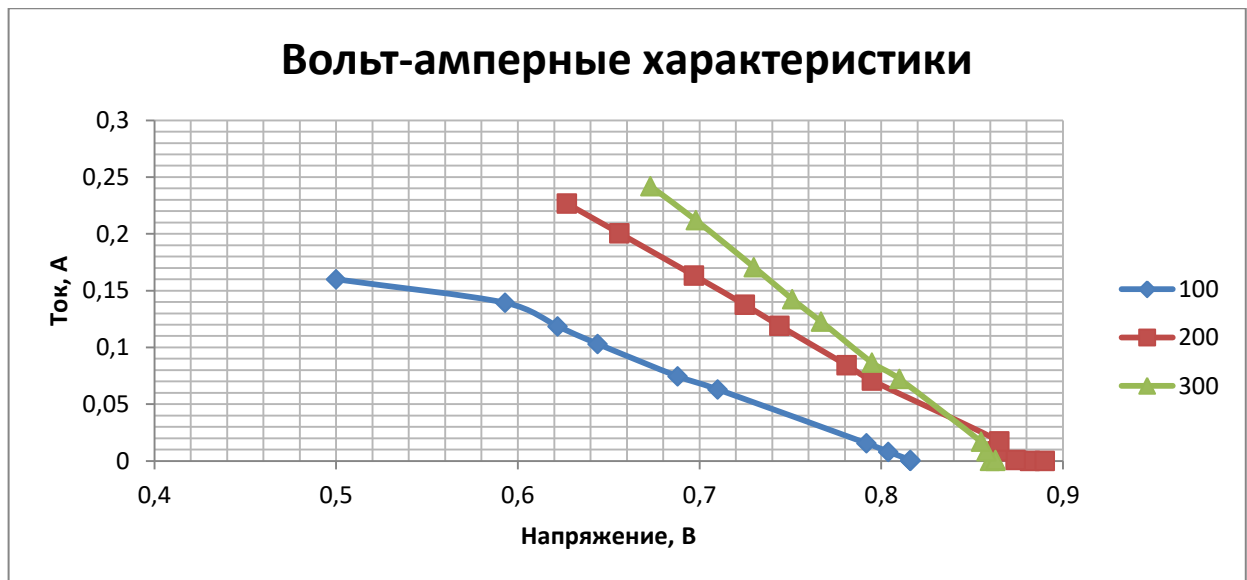


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики топливного элемента

Топливом в данном эксперименте являлся чистый водород марки «А», который подавали из баллона через редуктор и контроллер потока газа. Для получения максимальной мощности на нагрузке топливного элемента и ее измерения нужно: рассчитать ток ( $I$ ) и напряжение ( $U$ ) в цепи по формулам (1) и (2), где  $R_H$  – сопротивление нагрузки,  $R_{BH}$  – внутреннее сопротивление ТЭ,  $\varepsilon$  – напряжение на открытой цепи (OCV – Open-Circuit Voltage):

$$I = \frac{\varepsilon}{R_H + R_{BH}}, \quad (1)$$

$$U = R_H I = \frac{\varepsilon R_H}{R_H + R_{BH}}. \quad (2)$$

Так как мощность ( $W$ ) определяется как произведение напряжения на ток в цепи, при подстановке туда формул (1) и (2), получим:

$$W = \frac{\varepsilon^2 R_H}{(R_H + R_{BH})^2}. \quad (3)$$

Графическое отображение функциональной зависимости мощности от сопротивления нагрузки в формуле (3) представлено на рисунке 7.

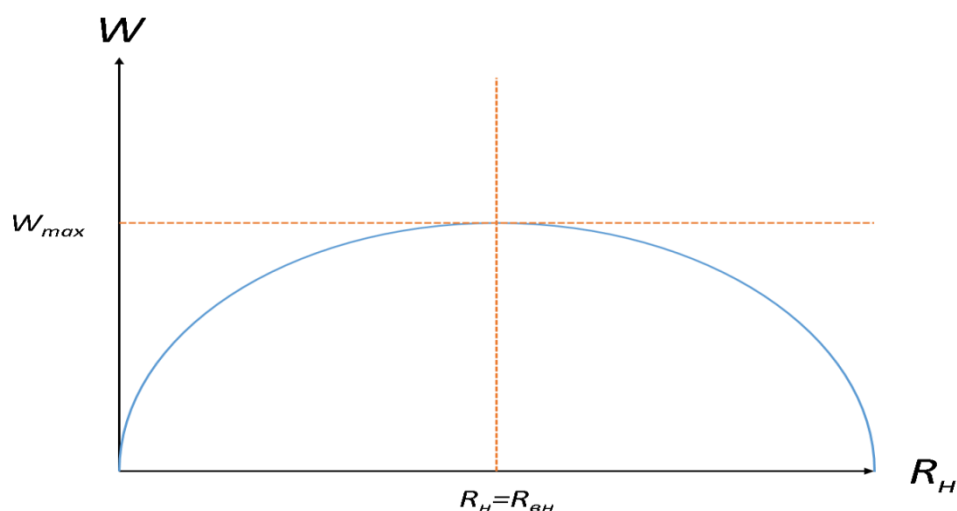


Рис. 7. Зависимость мощности ТЭ от сопротивления нагрузки

Из графика видно, что у этой функции всего один максимум и достигается он при условии равенства внутреннего сопротивления и сопротивления нагрузки. Учитывая это обстоятельство, формулы (1) - (3) могут быть переписаны в виде:

$$I_{max} = \frac{\varepsilon}{2R_{вн}}, \quad (4)$$

$$U_{max} = \frac{\varepsilon}{R_H + R_{вн}} = \frac{\varepsilon R_H}{2R_H} = \frac{\varepsilon}{2}, \quad (5)$$

$$W_{max} = \frac{\varepsilon^2}{4R_{вн}}. \quad (6)$$

При проведении эксперимента необходимо учитывать, что в сопротивление нагрузки  $R_H$  в этих формулах также входит и контактное сопротивление, которое при малых значениях сопротивления нагрузки может вносить заметный вклад.

Постепенно снижая сопротивление нагрузки ( $R_H$ ), регистрировали показания первого ( $V_1$ ) и второго ( $V_2$ ) вольтметров. Снижение  $R_H$  необходимо проводить до тех пор, пока значение на втором вольтметре  $V_2$  не достигнет величины половины ОСВ (на практике это значение колеблется в пределах 0,4 – 0,35 В). Дальнейшее снижение сопротивления нагрузки может повлечь за собой

окисление анода, что, в свою очередь, может привести к нарушению целостности электролитного слоя и разгерметизации трубки. Полученные значения приведены в Приложении. Далее по формуле (3) можем рассчитать мощность и построить зависимость мощности от плотности тока (рис. 8).

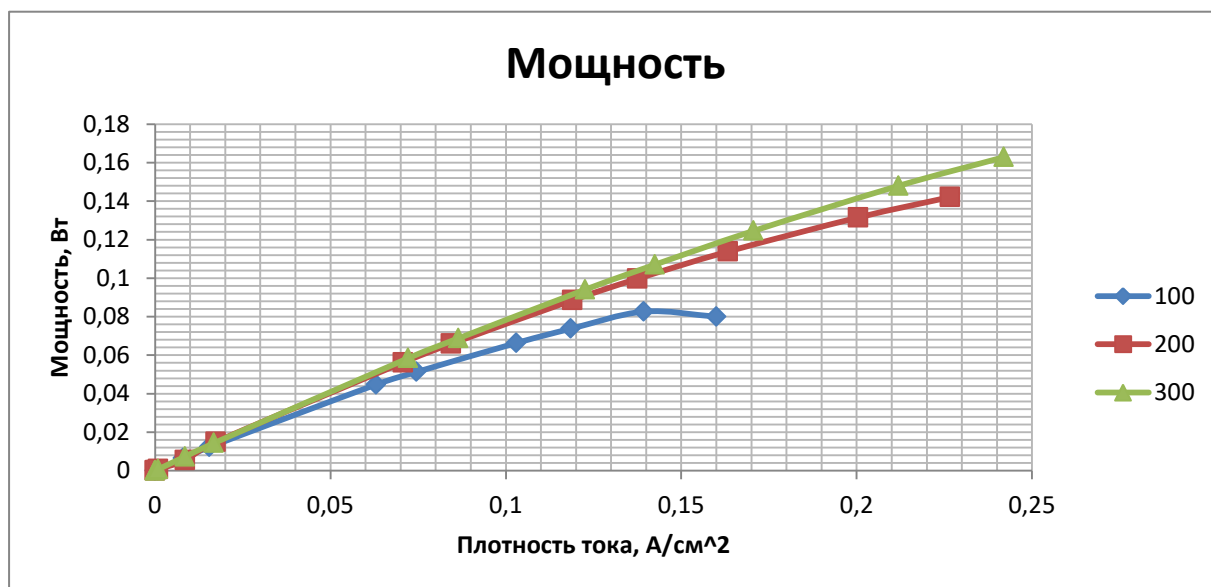


Рис. 8. График зависимости мощности от плотности тока

Полученные экспериментальные значения максимальной мощности составили:  $W = 0,08$  Вт ( для  $H_2 = 100$  см³/мин ),  $W = 0,1421$  Вт ( для  $H_2 = 200$  см³/мин ),  $W = 0,1628$  Вт ( для  $H_2 = 300$  см³/мин ). На графике хорошо наблюдается увеличение максимальной мощности ТЭ с ростом скорости потока водорода. Это можно объяснить тем, что увеличение скорости потока водорода в ТЭ означает увеличение объема подачи топлива в зону реакции в единицу времени и, как следствие, возрастание напряжения и мощности.

### Анализ погрешностей

Погрешности измерения времени релаксации ЭДС определялись точностью регистрирующей аппаратуры. Измерения напряжения проводились с помощью мультиметра серии DT9208A, погрешность которого не превышает 0.5%. Наблюдается значительное отклонение зависимости ЭДС ТЭ от экспо-

ненциальной после 200 секунд релаксации, поэтому аппроксимация экспонентой проводилась по значениям ЭДС в интервал времени от 1 до 200 секунды. Точность определения времени релаксации по аппроксимирующей функции составила  $\sim 10\%$ .

Мощность водород-кислородного ТЭ с керамической мембраной рассчитывалась по измеренным напряжениям  $V_1$  и  $V_2$ , которые также измеряли мультиметром серии DT9208A с точностью не хуже 0.5%. Точность задания сопротивления нагрузки магазином сопротивлений не более 0.1%. Общая относительная погрешность измерений  $\Delta W/W = 2\Delta V/V + 2\Delta R/R = 1.2\%$ .

## **Вывод**

В работе был рассмотрен принцип действия простейшего водородного топливного элемента и получена зависимость ЭДС от времени. Таким образом, было экспериментально подтверждено, что для получения постоянного напряжения необходима непрерывная подача реагентов в рабочую область ТЭ.

Были получены вольт-амперные характеристики для различных значений скорости подачи водорода, рассчитана максимальная мощность водородного топливного элемента, получена ее зависимость от плотности тока при нескольких значениях скорости потока водорода.

## Приложение

Таблица 1. Показания на первом и втором вольтметрах при изменении сопротивления нагрузки и постоянной скорости потока водорода ( $H_2 = 100 \text{ см}^3/\text{мин}$ )

| $H_2, \text{ см}^3/\text{мин}$ | 100              |                  |                             |                             |                                      |
|--------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| $R_H, \text{ Ом}$              | $V_1, \text{ В}$ | $V_2, \text{ В}$ | $I_1, \text{ А } (V_1/R_H)$ | $W = I_1 * V_1, \text{ Вт}$ | $W/S, \text{ Вт/см}^2$<br>(удельная) |
| 50000                          | 0,82             | 0,816            | 0,0000164                   | 1,3382E-05                  | 2,6765E-05                           |
| 10000                          | 0,82             | 0,816            | 0,000082                    | 6,6912E-05                  | 0,00013382                           |
| 1000                           | 0,817            | 0,16             | 0,000817                    | 0,00013072                  | 0,00026144                           |
| 100                            | 0,797            | 0,804            | 0,00797                     | 0,00640788                  | 0,01281576                           |
| 50                             | 0,776            | 0,792            | 0,01552                     | 0,01229184                  | 0,02458368                           |
| 10                             | 0,63             | 0,71             | 0,063                       | 0,04473                     | 0,08946                              |
| 8                              | 0,596            | 0,688            | 0,0745                      | 0,051256                    | 0,102512                             |
| 5                              | 0,515            | 0,644            | 0,103                       | 0,066332                    | 0,132664                             |
| 4                              | 0,474            | 0,622            | 0,1185                      | 0,073707                    | 0,147414                             |
| 3                              | 0,418            | 0,593            | 0,13933333                  | 0,08262467                  | 0,16524933                           |
| 2                              | 0,32             | 0,5              | 0,16                        | 0,08                        | 0,16                                 |

Таблица 2. Показания на первом и втором вольтметрах при изменении сопротивления нагрузки и постоянной скорости потока водорода ( $H_2 = 200 \text{ см}^3/\text{мин}$ )

| $H_2, \text{ см}^3/\text{мин}$ | 200              |                  |                             |                             |                                      |
|--------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| $R_H, \text{ Ом}$              | $V_1, \text{ В}$ | $V_2, \text{ В}$ | $I_1, \text{ А } (V_1/R_H)$ | $W = I_1 * V_1, \text{ Вт}$ | $W/S, \text{ Вт/см}^2$<br>(удельная) |
| 50000                          | 0,885            | 8,882            | 0,0000177                   | 0,00015721                  | 0,00031442                           |
| 10000                          | 0,89             | 0,89             | 0,000089                    | 0,00007921                  | 0,00015842                           |
| 1000                           | 0,876            | 0,874            | 0,000876                    | 0,00076562                  | 0,00153125                           |
| 100                            | 0,856            | 0,64             | 0,00856                     | 0,0054784                   | 0,0109568                            |
| 50                             | 0,864            | 0,865            | 0,01728                     | 0,0149472                   | 0,0298944                            |
| 10                             | 0,707            | 0,795            | 0,0707                      | 0,0562065                   | 0,112413                             |
| 8                              | 0,675            | 0,781            | 0,084375                    | 0,06589688                  | 0,13179375                           |
| 5                              | 0,595            | 0,744            | 0,119                       | 0,088536                    | 0,177072                             |
| 4                              | 0,55             | 0,725            | 0,1375                      | 0,0996875                   | 0,199375                             |
| 3                              | 0,49             | 0,697            | 0,16333333                  | 0,11384333                  | 0,22768667                           |
| 2                              | 0,401            | 0,656            | 0,2005                      | 0,131528                    | 0,263056                             |
| 1,5                            | 0,34             | 0,627            | 0,22666667                  | 0,14212                     | 0,28424                              |

Таблица 3. Показания на первом и втором вольтметрах при изменении сопротивления нагрузки и постоянной скорости потока водорода ( $H_2 = 300 \text{ см}^3/\text{мин}$ )

| $H_2, \text{ см}^3/\text{мин}$ | 300              |                  |                             |                             |                                      |
|--------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| $R_n, \text{ Ом}$              | $V_1, \text{ В}$ | $V_2, \text{ В}$ | $I_1, \text{ А } (V_1/R_n)$ | $W = I_1 * V_1, \text{ Вт}$ | $W/S, \text{ Вт/см}^2$<br>(удельная) |
| 50000                          | 0,87             | 0,863            | 0,0000174                   | 1,5016E-05                  | 3,0032E-05                           |
| 10000                          | 0,874            | 0,86             | 0,0000874                   | 7,5164E-05                  | 0,00015033                           |
| 1000                           | 0,873            | 0,863            | 0,000873                    | 0,0007534                   | 0,0015068                            |
| 100                            | 0,857            | 0,858            | 0,00857                     | 0,00735306                  | 0,01470612                           |
| 50                             | 0,84             | 0,855            | 0,0168                      | 0,014364                    | 0,028728                             |
| 10                             | 0,722            | 0,81             | 0,0722                      | 0,058482                    | 0,116964                             |
| 8                              | 0,692            | 0,795            | 0,0865                      | 0,0687675                   | 0,137535                             |
| 5                              | 0,613            | 0,767            | 0,1226                      | 0,0940342                   | 0,1880684                            |
| 4                              | 0,57             | 0,751            | 0,1425                      | 0,1070175                   | 0,214035                             |
| 3                              | 0,512            | 0,73             | 0,17066667                  | 0,12458667                  | 0,24917333                           |
| 2                              | 0,424            | 0,698            | 0,212                       | 0,147976                    | 0,295952                             |
| 1,5                            | 0,363            | 0,673            | 0,242                       | 0,162866                    | 0,325732                             |

## Список литературы

1. Козадеров О.А. Введенский А.В. Современные химические источники тока. Издательство «Лань», 2017 г., 132 с.
2. Нижниковский Е.А. Современные электрохимические источники тока. Издательство «Радиотехника», 2015г., 296 с.
3. Каменев Ю.Б., Чезлов И.Г. Современные химические источники тока. Гальванические элементы, аккумуляторы, конденсаторы. СПб.: СПбГУКиТ, 2009 г., 90 с.
4. Сраго И.А., Зенин Г.С. Основы электрохимии. Учебное пособие. Санкт-Петербург. Учебное пособие – СПб.: СЗТУ, 2005 г., 45 с.