План пособия

1.Теория водорода и топливных элементов

2.Лабораторные занятия

2.1 Техника безопасности

2.2 Знакомство с системой

Для чего нужны топливные элементы?

Вскоре после своего появления топливные элементы нашли своё применение в некоторых областях техники. Однако, «великий прорыв» пока заставляет себя ждать. Все технические продукты, используемые нами в повседневной жизни, пока ещё обходятся без использования технологии топливных элементов.
В этом разделе вы узнаете, почему стоит пристальнее присмотреться к топливным элементам и какой потенциал для технологий будущего они в себе заключают.

Возможности использования

Несмотря на то, что принцип действия топливных элементов был открыт более 150 лет назад, первое их техническое применение (в области космонавтики) приходится на 1960 год. В годы энергетического кризиса 1970 - 1980 гг. появились первые опытные электростанции, работающие на этом принципе, которые, однако, не нашли широкого распространения. Сегодня существует целый ряд других областей использования топливных элементов, которые, рассматривая их с точки зрения мобильности, можно разделить на три класса:

Стационарное использование



Стационарное использование характеризуется использованием агрегата в одном месте, и при этом не предполагается какая-либо его транспортировка. Преимуществом данного способа является то, что требуемый для работы водород можно не хранить в ёмкостях, что требует существенных затрат а, вместо этого, подводить его по трубопроводам.
Типовым примером такого использования является теплоэнергоцентраль. Здесь, наряду с электрической энергией, в качестве «побочного продукта» вырабатывается тепло, используемое для обогрева зданий.

Мобильное использование



Этот вариант использования относится к мобильному варианту. Однако, исходя из размеров агрегатов, они не годятся для «переноски», как при портативном использовании. В этом случае топливные элементы служат для того, чтобы снабжать энергией электрические двигатели. При этом водород также должен перемещаться в соответствующей ёмкости, что неминуемо влечёт за собой дополнительные расходы.
Этот принцип используется, например, в грузовиках и автобусах, а также в подводных лодках и на железных дорогах. В рамках данного курса будет подробнее рассмотрен

автомобиль «MercedesBenz B-класса», работающий по тому же принципу.

Портативное использование



Подобные агрегаты, предназначенные для мобильного использования, так малы и легки, что их можно даже переносить. Это условие (возможность переноски) применимо также и к ёмкостям для хранения водорода, которые должны обеспечивать водородом эти портативные топливные элементы.

Примерами подобного использования являются аварийные агрегаты энергоснабжения, блоки энергоснабжения автомобилей – «домов на колёсах», жилых контейнеров или трейлеров. В качестве альтернативы аккумулятору компактные топливные элементы могут использоваться в ноутбуках или даже в мобильных телефонах.

Водород

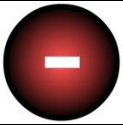
Топливный элемент может работать только тогда, когда у него в наличии имеется достаточное количество водорода. Таким образом, водород является «топливом» (или «горючим») для топливных элементов.

Модель атома

Любой вид материи состоит из атомов. А чем же, собственно говоря, являются атомы? Исследователи, например, атомные физики, уже много лет пытаются найти однозначный ответ на этот вопрос. Однако если подумать, что даже такие мелкие вещи, как булавочная головка, состоят из бесчисленного множества атомов (и молекул), становится ясным, что атом должен быть чрезвычайно маленьким. Атом можно себе представить как шарик диаметром ок. 10^{-10} метра. Это соответствует всего лишь 0,1 нанометра (= 0,1 нм).

Так как эти атомы столь малы, их нельзя увидеть даже под сильным микроскопом. Но в ходе истории различные ученые разработали модели, на которых можно объяснить вид атома. Мы ограничимся здесь моделью атома, разработанной датским физиком Нильсом Бором уже в 1913 году.

При этом различают три различных составных элемента атома:

		
Протон - представляет собой положительно заряженную частицу. Его можно изобразить в виде шара, имеющего определённую массу. Эта масса в человеческом понимании	**Нейтрон** тоже является шарообразной частицей, имеющей массу, сравнимую с массой протона. Но в противоположность протону, нейтрон не имеет заряда. Поэтому, можно добавить или	**Электрон** представляет собой полную противоположность протону. А его масса в 1000-кратном размере меньше массы протона или нейтрона. Электрон находится не в атомном ядре, а движется вокруг ядра по орбите. И

ничтожно мала (1,6 * 10^{-27} кг), но в атомарных соотношениях она оказывает большое влияние на общий вес атома. Протоны находятся в атомном ядре.	удалить нейтрон из атома, но заряд атома при этом не изменится. Изменится только масса атома.	хотя масса электрона очень мала, он имеет заряд той же величины, что и протон, но знак заряда электрона отрицательный.

Если речь идёт об атомах, то количество протонов в атомном ядре (называемое также атомным номером) определяет, о каком химическом элементе идёт речь. В настоящее время известно около 120 разичных элементов, таких как, например, железо (Fe), медь (Cu), кислород (O) и водород (H) и др. Однако существует много элементов, которые имеют в составе своего атомного ядра различное количество нейтронов. Таких элементов, так называемых "изотопов", в настоящее время известно несколько сотен.

Все химические элементы сгруппированы в "Периодическую систему элементов" (PSE). В ней они отсортированы согласно их атомным номерам, начиная с "1". Однако, этим кратким рассмотрением периодической системы в рамках данного курса мы и ограничимся. И если мы будем искать в периодической системе водород, необходимый для топливных элементов, то мы найдём его на первом месте. В связи с этим ясно, что водород имеет минимальный атомный номер и, поэтому, является элементом, чьё атомное ядро состоит из минимального количества элементов. Таким образом, атом водорода имеет в своём ядре только один протон. Нейтронов в его ядре нет совсем. В электронной оболочке атома также находится всего один электрон, поэтому водород, как правило, является электрически нейтральным.

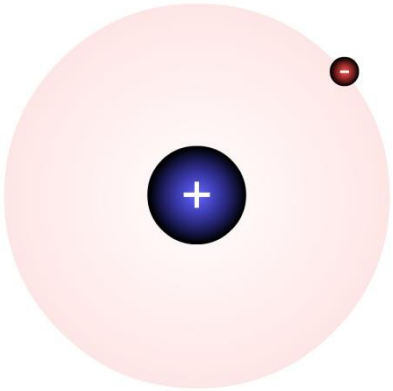


Рис. 1 – модель атома водорода

Молекула H_2

А как же, собственно говоря, происходят химические реакции?

Все химические элементы стремятся к тому, чтобы их наружная оболочка была полностью «укомплектована» электронами. Поэтому их атомы принимают на внешнюю оболочку дополнительные электроны. Наряду с этим атомы могут и отдавать электроны. Если на внешней оболочке не остается ни одного электрона, эта оболочка в атоме отсутствует, а следующая внутренняя оболочка полностью занята электронами, то есть атом достиг желанной цели. Такое состояние атомов называется **«состоянием инертного газа».**

С другой стороны, атомы не могут просто так ловить электроны или отдавать их в «никуда». Для этого рядом с ними должен находиться другой подходящий атом. Только в этом случае атомы могут обмениваться электронами (образовывать ионную связь) или совместно использовать электроны (образовывать парноэлектронную связь). Но для этого процесса необходимы химические реакции. Эти реакции могут протекать медленно, спокойно и незаметно или быстро и бурно. Например, железо ржавеет потому, что атомы железа (Fe) соединяются с атомами кислорода с образованием окиси железа (хорошо видимой из-за ее коричневатого цвета). Примером другой, бурной химической реакции является реакция взрывчатого вещества, которая может иметь сильное разрушающее действие.

Строение атома водорода вам уже известно. Этот атом имеет всего один электрон и одну оболочку. Для того, чтобы эта оболочка была полностью заполнена, атому водорода нужен еще один электрон, поэтому он постоянно находится в поиске реагента, который мог бы дать ему недостающий электрон. Если вблизи одного атома водорода находится другой атом водорода, ни один из атомов не отдает своего электрона. Вместо этого оба атома образуют парноэлектронную связь. При этом на внешней (и единственной) оболочке каждого атома в сумме находится по два электрона. Два связанных между собой атома всегда образуют **молекулу**, в данном случае – H_2:

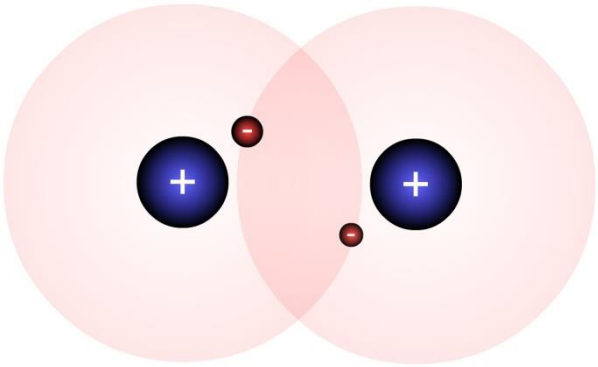


Рис. 2 – модель молекулы водорода

Кислород

Так как наряду с водородом, системе конструкции топливного элемента ведущую роль играет также химичекий элемент "кислород (O)", то он тоже должен быть рассмотрен. В периодической системе элементов, кислород находится на 8 месте. Это обозначает, что в ядре атома кислорода находится восемь протонов. Далее, из периодической системы можно узнать, что масса атома O имеет 16 массовых единиц. Так как массой обладают только протоны и нейтроны, то остаток массы приходится на нейтроны. Таким образом, атом кислорода имеет восемь нейтронов. Этим определяется состав атомного ядра кислорода. Атом в целом, выглядит следующим образом:

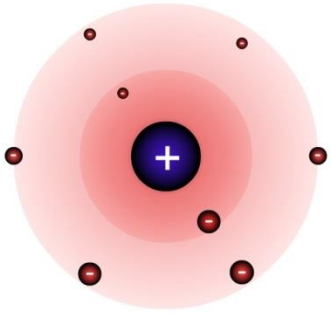


Рис. 3 – модель атома кислорода

При обычных условиях, кислород находится в газообразном состоянии, так что люди и животные могут вдыхать его вместе с воздухом. В составе воздуха кислород находится в виде молекулы, имеющей двойную связь. Причина этого лежит в количестве электронов, имеющихся в его внешней оболочке. Атом О всего имеет восемь электронов, два из которых находятся во внутренней оболочке. Оставшиеся шесть электронов двигаются во внешней оболочке. Таким образом, для достижения состояния идеального газа, атому кислорода необходимо ещё два других электрона, которые он с удовольствием 'одалживает' у другого атома кислорода, в виде образования с ним двойной электронной пары. Следовательно, в воздухе кислород чаще всего представлен в виде O_2.

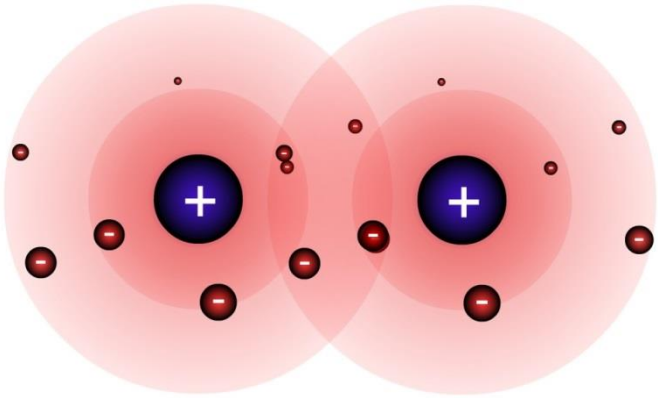


Рис. 4 – модель молекулы кислорода

Конструкция и принцип действия топливных элементов

В этом разделе вы познакомитесь с составными частями и принципом действия топливных элементов.

Топливный элемент и пакет топливных элементов

Один топливный элемент (в зависимости от оснащения) может обеспечить лишь небольшую величину выходного напряжения и небольшой выходной ток. Для работы электрических приборов электрическая мощность, имеющаяся в наличии у одного топливного элемента, безусловно, недостаточна. Когда мы говорим о топливных элементах, то обычно имеют в виду комплексный агрегат, который содержит так называемые «пакеты» (один или несколько). Пакет состоит из нескольких отдельных топливных элементов-ячеек.

Схемы подключения пакетов топливных элементов

Как и электрические сопротивления, источники электрической энергии (например, отдельные топливные элементы в пакете модели Mercedes F-CELL) могут подключаться по последовательной или параллельной схеме:

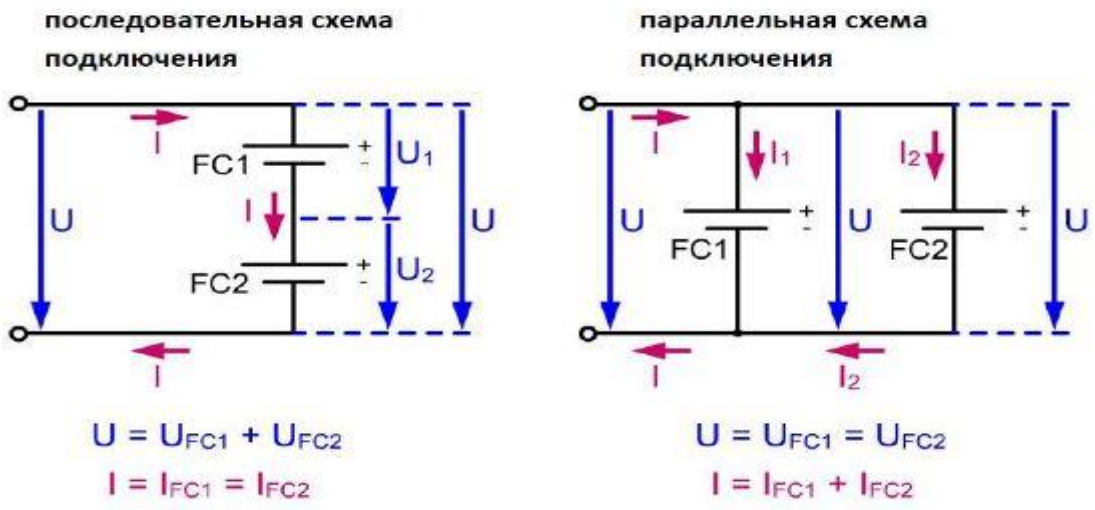


Рис. – схемы подключения пакетов ТЭ

При последовательной схеме подключения повышается **выходное напряжение**. При параллельной схеме подключения пакет выдает более высокую **силу тока**. На практике отдельные топливные элементы соединяются между собой так, чтобы весь пакет обладал требуемыми характеристиками (макс. силой тока и напряжением на клеммах). Эти характеристики зависят от агрегата, получающего электроэнергию от пакета. Поэтому часто используются **смешанные схемы подключения**:

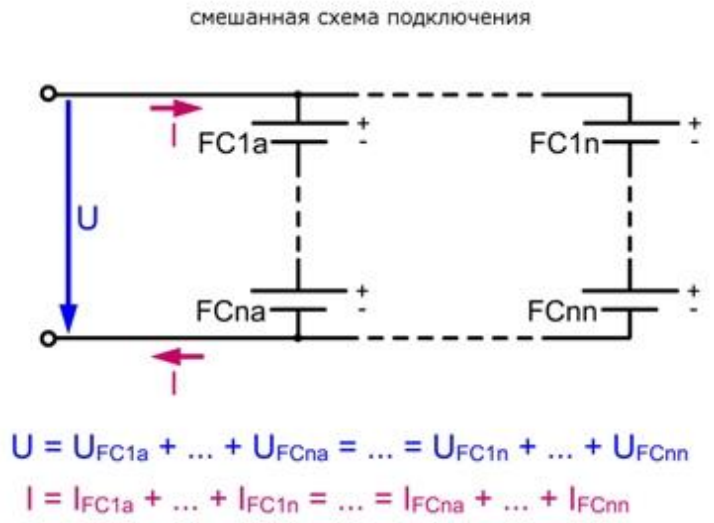


Рис. – смешанная схема подключения пакетов ТЭ

Расход веществ

Топливный элемент – это техническая система. Характерная особенность технических систем типа топливного элемента состоит в том, что в них должно поступать какое-нибудь вещество, которое к них перерабатывается. В результате переработки образуются выходные величины системы – энергия и какое-то вещество (вода). Таким образом, топливный элемент представляет собой вещественно-преобразующую и энергопреобразующую систему.

На следующем рисунке показаны входные и выходные величины топливного элемента. Поскольку существует несколько типов топливных элементов с разными входными величинами, на первом рисунке приведено общее описание.



Рис. - Схема расхода веществ ТЭ

Слева находятся **входные величины**. Все топливные элементы используют два вещества – **топливо** и **окислитель**, с которым реагирует топливо в элементе. В качестве окислителя в топливных элементах используется кислород. Некоторые типы топливных элементов потребляют кислород, содержащийся в атмосфере, а для некоторых типов нужен чистый кислород (O_2).

Выходные величины: в результате энергетического преобразования топливный элемент выделяет **электрическую энергию** и **тепловую энергию**. При этом тепло часто является лишним, сопутствующим продуктом и требует отведения или охлаждения. Это тепло называется **тепловыми потерями**. Еще одна неиспользуемая выходная величина – это **вещественный побочный продукт** или **отход**. Как правило, этим продуктом является вода.

На следующем рисунке изображен тип топливного элемента, используемый как в модели F-CELL, так и в нашем курсе UniTrain. Этот тип называется топливным элементом с протон-обменной мембраной.

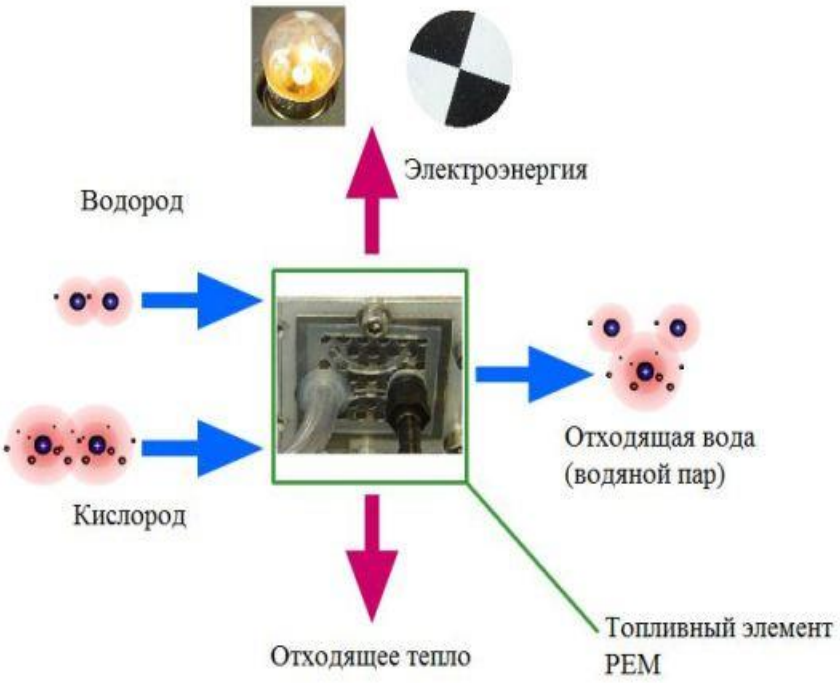


Рис. - Схема расхода веществ топливным элементом с протон-обменной мембраной.

Входные величины этого типа – водород (H_2) в качестве топлива и кислород (O_2) в качестве окислителя.

К выходным величинам рассматриваемого топливного элемента с протон-обменной мембраной относятся электрическая энергия, тепло и вода (H_2O).

Выработка и обмен H2

В этом разделе вы узнаете, как вырабатывается, хранится и перевозится водород.

Производство H_2 способом риформинга

Для работы топливных элементов необходим газообразный водород H_2. Такой химический элемент, как водород, существует на нашей планете в огромном количестве, однако в основном в связанном виде (например, в молекулах воды H_2O). Помимо этого водород содержится во многих горючих газах, например, в природном газе, который используется в больших объемах для отопления и подается во многие дома по проложенным под землей газопроводам. Процесс «выделения» водорода, содержащегося в таких горючих газах, носит название «**риформинг**».

Существует большое количество разнообразных типов **природного газа**, но все они в основном (примерно на 85-98 %) состоят из метилводорода, известного под названием метан. Поэтому принцип процесса риформинга мы рассмотрим на примере **метана** (CH_4).

Получение H_2 методом риформинга представляет собой трехступенчатый процесс. На первом этапе метан реагирует с водяным паром в присутствии никелевого катализатора с образованием водорода и окиси углерода.

$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3\ H_2$

Этот процесс является эндотермическим, то есть, он протекает должным образом только при подводе большого количества тепловой энергии. Необходимая температура реакции 700-900 °C достигается за счет сжигания определенной части природного газа. Помимо этого отходящее тепло (до 850 °C) может использоваться в высокотемпературных топливных элементах.

Вторая ступень называется «конверсией» или «реакцией сдвига». Она представляет собой реакцию окиси углерода с водяным паром, в результате которой образуются двуокись углерода и дополнительный водород.

$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$

Эта реакция также требует определенной температуры – около 300 °C. Обе реакции проходят непосредственно друг за другом, поэтому суммарную реакцию можно записать в виде следующей формулы:

$CH_4 + 2\ H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4\ H_2$

На третьем этапе остаточная окись углерода доводится окислением до CO_2 или отфильтровывается с помощью специальной мембраны. Полученный водород отделяется от двуокиси углерода и применяется в качестве топлива в топливных элементах.

Установка для риформинга может находиться в двух разных местах. Соответственно существуют две концепции ее применения:

Концепции	Преимущества	Недостатки
Установка для риформинга находится непосредственно вблизи топливного элемента, поэтому создается впечатление, что топливный элемент работает	Водород производится рядом с потребителем. При этом количество H2 соответствует потреблению топливного элемента. Поэтому нет	При работе установка для риформинга потребляет энергию, что трудно обеспечить особенно в мобильных системах.

на одном из описанных выше исходных веществ. В действительности же установка риформинга превращает исходное вещество в водород, который затем используется в топливном элементе.	необходимости в крупных аккумуляторах водорода. Хранение и перевозка водорода – очень сложное дело, а хранить и перевозить исходные вещества довольно просто.	Кроме того, она должна быть очень компактной, а это связано с большими затратами и делает ее очень дорогой.
Установка для риформинга находится в другом месте, чем топливный элемент. Она может быть крупной и производить водород для многих топливных элементов. Водород приходится доставлять к топливным элементам в специальных емкостях.	Установка для риформинга может иметь любые габариты, что повышает ее КПД в сравнении с компактными установками. Из расчета на единицу объема H2 производство на таких установках обходится дешевле.	Водород нужно хранить и доставлять на место потребления. Так как H2 существует, как правило, в газообразной форме и легко возгорается, его нужно хранить под высоким давлением в специальных емкостях или сильно охлаждать с высоким расходом энергии.

Производство H_2 способом электролиза

Вторая возможность производства H_2 называется **электролиз**. Этот метод состоит в проведении химической реакции путем использования электрической энергии и нередко применятся для получения металлов и газообразных веществ.

Водород получается путем электролиза воды, то есть разложения воды под воздействием постоянного тока на ее составные части – водород и кислород. Для этого достаточно погрузить в сосуд с водой два электрода и приложить к ним постоянный ток. При этом один электрод является анодом (+), а другой – катодом (-).

На катоде и аноде начинает протекать ряд отдельных химических реакций. Их «промежуточными продуктами» являются **ионы гидроксида (OH-)** и **ионы гидрония (H_3O+)**. Поскольку эти имеют определенный заряд, они начинают перемещаться к электроду с соответственно противоположным зарядом и опять реагируют на нем с водородом и кислородом. В результате этого через воду течет **электрический ток**:

Анодное пространство	**Катодное пространство**
$4\ OH^- \rightarrow 2\ H_2O + O_2 + 4\ e^-$	$2\ H_2O + 2\ e^- \rightarrow H_2 + 2\ OH^-$
$6\ H_2O \rightarrow 3\ H_3O^+ + O_2 + 4e^-$	$2\ H_3O+ + 2\ e^- \rightarrow 2\ H_2O + H_2$

Все эти реакции можно выразить **суммарной формулой**:

$2\ H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$

К сожалению, для протекания этого процесса необходимо довольно большое количество электрической энергии. Особенно интересным этот процесс может стать в том случае, если в нем используется энергия из возобновляемых источников, например, солнечная или ветряная энергия.

Аккумуляторы водорода

Только в некоторых случаях водород может производиться и использоваться в режиме «justintime». Как правило, водород приходится аккумулировать. Поскольку хранение большого количества газообразного водорода при атмосферном давлении возможно только в емкости значительного объема, водород перед хранением должен быть сжат соответствующими способами.

Важным параметром при оценке и конструировании аккумуляторов является плотность хранения, которая определяется соотношением аккумулируемой массы H_2 к объему (объемная плотность хранения) или к массе (гравиметрическая плотность хранения) аккумулятора водорода. Если важно знать, каково энергетическое содержание аккумулятора водорода (то есть количество химически связанной энергии, хранящейся в нем в форме H_2), то плотность хранения можно также выразить в виде отношения аккумулируемой энергии к объему или массе аккумулятора. Из этого следует, что плотность хранения может быть рассчитана по следующим формулам:

$$\rho_{m\,vol} = \frac{m_{H2}}{V_S}$$

$$\rho_{m\,grav} = \frac{m_{H2}}{m_S}$$

$$\rho_{W\,vol} = \frac{W_{ch\,H2}}{V_S}$$

$$\rho_{W\,grav} = \frac{W_{ch\,H2}}{m_S}$$

ρ_{mvol} = объемная плотность хранения по массе

ρ_{mgrav} = гравиметрическая плотность хранения по массе

ρ_{Wvol} = объемная плотность хранения по энергии

ρ_{Wgrav} = гравиметрическая плотность хранения по энергии

m_{H2} = масса аккумулируемого водорода

$W_{ch\,H2}$ = энергетическое содержание аккумулируемого водорода

V_S = объем аккумулятора водорода

m_S = масса аккумулятора водорода

Плотность хранения может выражаться в разных единицах измерения. Как правило, она указывается в кВтч/л или кВтч/кг, но встречаются и такие единицы измерения, как $г_{H2}$/л, $г_{H2}$/кг, %vol и %m (объемные и весовые проценты).

Основные виды хранения водорода перечислены ниже:

Вид хранения	Примерная плотность хранения
Аккумуляторы сжатого водорода – это емкости для газообразного водорода, находящегося под высоким давлением до 700 бар, что позволяет существенно повысить плотность хранения. Этот способ хранения широко распространен, поскольку он относительно прост и дешев. Для перевозки водорода используются цистерны с давлением до 350 бар. Баки модели «Mercedes B-класса» F-CELL заправляются под давлением 700 бар, в результате чего повышается плотность хранения. В зависимости от давления в аккумуляторе на сжатие расходуется до 15 % теплотворности хранимого водорода..	$\varphi_{W\ vol\ 700\ bar}$ = 0,9 kWh/ l $\varphi_{W\ grav\ 700\ bar}$ = 1,7 kWh / kg
Аккумуляторы жидкого водорода предназначены для хранения водорода не в газообразной, а в жидкой форме. Для хранения водород охлаждается до -253 °C. При этом он становится жидким. Если в баке не поддерживать эту чрезвычайно низкую температуру, водород опять перейдет в газообразное состояние, и сработают предохранительные клапаны сброса давления. Этот способ хранения относительно дорог из-за требуемой теплоизоляции и сложного охлаждения, но отличается высокой плотностью хранения. На многоступенчатое охлаждение расходуется около 25 % энергии жидкого водорода.	$\varphi_{W\ vol}$= 1,0 kWh / l $\varphi_{W\ grav}$ = 1,8 kWh/ kg
Металлогидридный аккумулятор заполнен металлогидридным порошком, который способен принимать водород в структуру металлической сетки. Некоторые сплавы впитывают водород, как губка, уже при относительной низкой температуре. Примечательно, что плотность хранения при этом лишь немного отличается от показателей аккумуляторов жидкого водорода. Поскольку эти аккумуляторы внутри не «пусты», а заполнены металлогидридным порошком, они имеют довольно высокий вес, а, следовательно, и относительно низкую гравиметрическую плотность хранения.	$\varphi_{W\ vol}$ = 1,2 kWh / l $\varphi_{W\ grav}$ = 0,5 kWh/ kg

В технической литературе зачастую встречаются довольно разные сведения о параметрах плотности хранения. Это объясняется наличием различных изготовителей аккумуляторов водорода. Так, аккумуляторы жидкого водорода одного изготовителя по весу и объему могут существенно отличаться от аккумулятора другого изготовителя. Наилучшие показатели имеют, как правило, крупные аккумуляторы. К тому же, не во всех источниках информации при расчете плотности хранения учитывается вес аккумуляторов и всех

периферийных устройств. Поэтому выше приведены округленные и усредненные показатели, полученные путем обработки сведений из различных источников.

Правила техники безопасности и предупреждения

Система энергоснабжения на топливных элементах разработана и изготовлена с соблюдением действующих технических правил. На заводе-изготовителе она подвергается функциональным испытаниям и контролю безопасности.

Система энергоснабжения на топливных элементах – это лабораторная система для исследовательских и учебных целей. К работе на ней допускается только персонал с соответствующей квалификацией, прошедший необходимый инструктаж. Ее конструкция отличается от конструкции «потребительских» изделий, которые не требуют особых знаний по правильному управлению и применению и защищены от грубых ошибок в обслуживании

Ошибки в ходе применения и обслуживания этой системы могут привести к возникновению опасностей для людей, самой системы энергоснабжения на топливных элементах и других материальных ценностей. Система энергоснабжения на топливных элементах вырабатывает электричество под низким напряжением путем электрохимического преобразования водорода. Используемый в ней водород хранится под давлением в баллонах или металлогидридных аккумуляторах или вырабатывается специальным генератором водорода.

Изложенные в данной инструкции условия эксплуатации и технического обслуживания системы подлежат неукоснительному соблюдению. При передаче системы энергоснабжения на топливных элементах третьим сторонам к ней должна прилагаться данная инструкция.

Использование по прямому назначению

Система энергоснабжения на топливных элементах предназначена исключительно для экспериментальных, демонстрационных, учебных и исследовательских целей. Ее применение в любых иных сферах запрещено. Из соображений безопасности самовольное внесение изменений в конструкцию системы энергоснабжения на топливных элементах и ее отдельных компонентов не допустимо. Запрещается демонтаж отдельных модулей системы энергоснабжения на топливных элементах. В частности, во избежание утечки водорода запрещено демонтировать резьбовые соединения на трубах и шлангах, по которым подается водород, а также отвинчивать болты крепления топливных элементов.

Источники опасности

Источники опасности	Возможные последствия	Меры техники безопасности
Применение водорода	Опасность воспламенения и взрыва 	Не курить, не применять открытое пламя!  Принять меры защиты от электростатических зарядов.
Неверное подключение электрических контактов	Опасность короткого замыкания 	Соблюдать предписанную полярность при подключении электрических проводов.
Вращающиеся лопасти вентилятора топливного элемента	Опасность нанесения травм 	Не допускать попадания пальцев и различных предметов в лопасти охлаждающего вентилятора.

Допускаемый к работе персонал

Все сотрудники, привлекаемые к работам по вводу в действие, управлению или техническому обслуживанию системы энергоснабжения на топливных элементах, должны знать и строго соблюдать действующие на месте ее эксплуатации правила техники безопасности и меры предосторожности. Принять меры по недопущению к монтажу, эксплуатации и техническому обслуживанию системы посторонних лиц. Во избежание возникновения опасных ситуаций весь обслуживающий персонал должен пройти инструктаж по работе с системой и технике безопасности при обращении с водородом. Поэтому к обслуживанию системы энергоснабжения на топливных элементах должны допускаться только лица,

- прошедшие должное обучение и обладающие необходимыми знаниями и навыками по безопасной и правильной эксплуатации систем на топливных элементах;
- проинструктированные оператором системы о правилах ее обслуживания и опасностях, связанных с эксплуатацией системы;
- ознакомившиеся с данной инструкцией по эксплуатации и
- знающие действующие предписания и правила обращения с водородом.

При проведении обучения учащиеся допускаются к работе с системой энергоснабжения на топливных элементах только под присмотром преподавателей. Преподаватели должны обеспечить соблюдение правил обращения с системой и обратить внимание учащихся на потенциальные опасности. К работам по монтажу, вводу в действие, выводу из действия и техническому обслуживанию контуров подачи водорода, а также наполнению металлогидридного аккумулятора допускаются только преподаватели.

Место установки и рабочее место

Система энергоснабжения на топливных элементах предназначена для установки и эксплуатации в оборудованных для этого лабораторных помещениях. Во избежание образования воспламеняющейся водородно-воздушной смеси в случае утечки водорода эти помещения должны быть оборудованы эффективной системой вентиляции. Помимо этого в помещениях должны быть установлены устройства защиты от электростатических зарядов. В ходе монтажа и эксплуатации системы подачи водорода следует неукоснительно соблюдать действующие на месте монтажа и эксплуатации правила техники безопасности. Особенно это относится к применению и хранению не входящих в объем поставки баллонов для сжатого водорода. Система энергоснабжения на топливных элементах должна быть прочно установлена на стабильном и прочном горизонтальном основании. Катализаторы и мембраны топливного элемента чувствительны к воздействию пыли и реактивных химикатов – серной кислоты (H2S) и других соединений серы, оксида углерода, аммиака, соединений хлора, а также растворителей. Поэтому не допускается установка, эксплуатация и хранение системы в помещениях, в воздухе которых присутствуют эти вещества. Допустимая температура воздуха в этих помещениях: от +5 до +35 °C.

Общие правила обращения с водородом

Водород – чрезвычайно легко воспламеняющийся газ.

Пользователь системы обязан принять все необходимые меры для недопущения скопления водорода в закрытых или непроветриваемых помещениях и образования воспламеняющейся или взрывоопасной смеси.

- Не допускать сильного нагрева воздуха вблизи системы энергоснабжения на топливных элементах и источника подачи водорода.
- Не курить и не пользоваться открытым пламенем.
- Принять меры защиты от электростатических зарядов.







Водород обладает невысокой плотностью, поэтому в закрытых и непроветриваемых помещениях он вытесняет воздух, что вызывает недостаток кислорода в верхней части помещений. Учитывая это, пользователь системы обязан обеспечить:

- достаточную вентиляцию лабораторного помещения,
- правильный монтаж оборудования, необходимого для снабжения системы водородом,
- периодический контроль герметичности труб, шлангов и резьбовых соединений, используемых для подачи водорода.

Меры безопасности в экстренных ситуациях

Утечка большого объема водорода:

- В течение всего времени существования опасности воспламенения в помещении не пользуйтесь электрическими устройствами, выключателями и т.п.
- Немедленно прервите подачу водорода в систему путем закрытия вентиля на источнике водорода.
- Обеспечьте хорошую вентиляцию вблизи места утечки водорода.

Воспламенение или взрыв водорода:

- Немедленно прервите подачу водорода в систему путем закрытия вентиля на источнике водорода.
- Сообщите о происшествии в пожарную часть и примите предписанные для лаборатории меры борьбы с пожаром.
- Дайте высвободившемуся в результате утечки водороду «догореть». **Осторожно, водород горит невидимым пламенем!**
- Погасите горящий металлогидридный порошок огнетушителем класса D или засыпьте его сухим песком. **Не используйте для тушения воду или углекислотный огнетушитель!** Если возгорание носит локальный характер, дайте порошку полностью догореть.

Прочие экстренные ситуации без утечки водорода:

Немедленно выключите систему, отсоедините от нее трубопровод подачи водорода и при необходимости перекройте запорный вентиль на баллоне со сжатым водородом или на металлогидридном аккумуляторе.

Приборы и материалы

CO3208-6A	Топливный элемент с преобразователем постоянного тока
CO3208-6B	Электронная нагрузка 200 Вт / 20 В / 10 А
CO3208-6C	Металлогидридный аккумулятор с магнитным вентилем
CO3208-6D	Электролизер

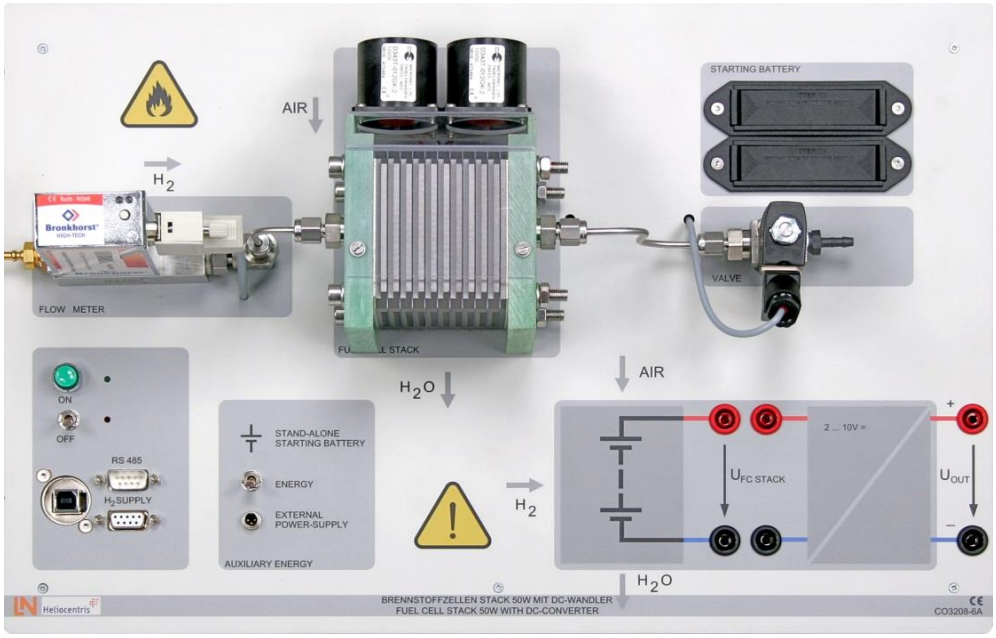
В системе используется дистиллированная вода. Электрическая проводимость применяемой воды не должна превышать 2 мкСм, поскольку в противном случае возможен выход из строя электролизера. Использование другой воды (например, водопроводной) не допускается, поскольку это ведет к поломке электролизера.

CO3208-6A

На этой экспериментальной панели установлены все функциональные элементы, необходимые для работы автономной системы электроснабжения на топливных элементах. Встроенный преобразователь постоянного напряжения с ограничителем максимального тока преобразует зависимое от нагрузки напряжение топливного элемента в стабильное напряжение 12 В, а встроенный интерфейс обеспечивает измерение всех важнейших величин, управление процессами и контроль параметров, имеющих значение для безопасности.

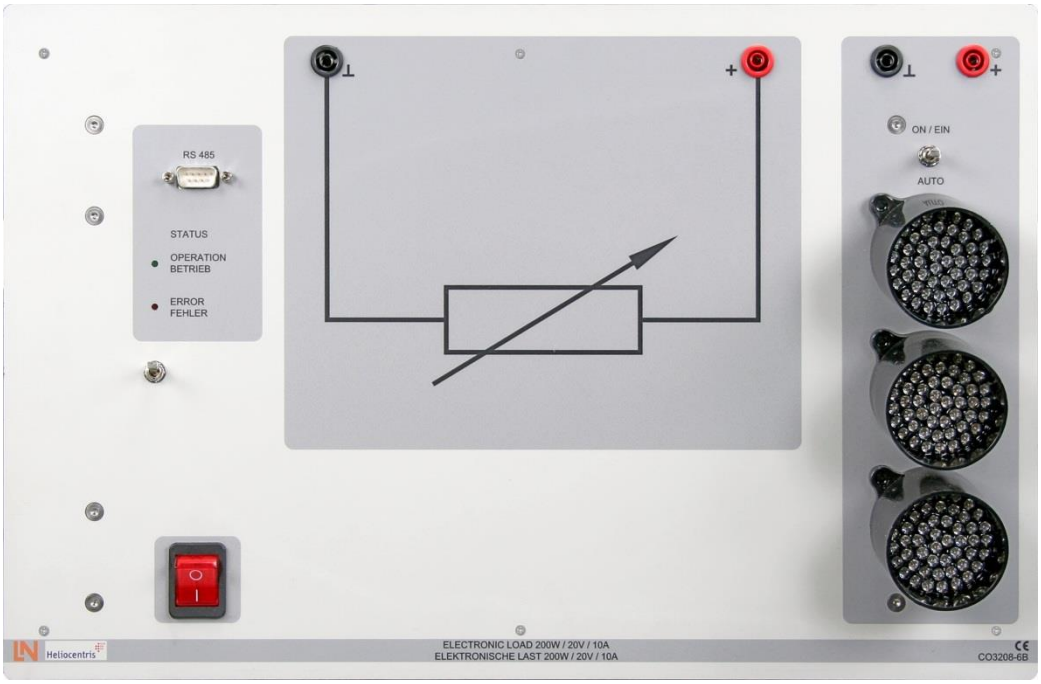
Для работы системы необходимы металлогидридный аккумулятор CO3208-6C и электронная нагрузка CO3208-6B.

Для обеспечения коммуникации с ПК требуется установка USB-драйвера. Её необходимо выполнить до первого запуска системы. Программное обеспечение находится на диске в каталоге "/Instrument/Driver/" или может быть найдено в Интернете по ключевому слову Keyspan USA 16HS (для систем предыдущей версии:PL 2303). Установленный драйвер создает виртуальный последовательный интерфейс COM-over-USB. Обратите внимание на правильный выбор COM-порта.



CO3208-6B

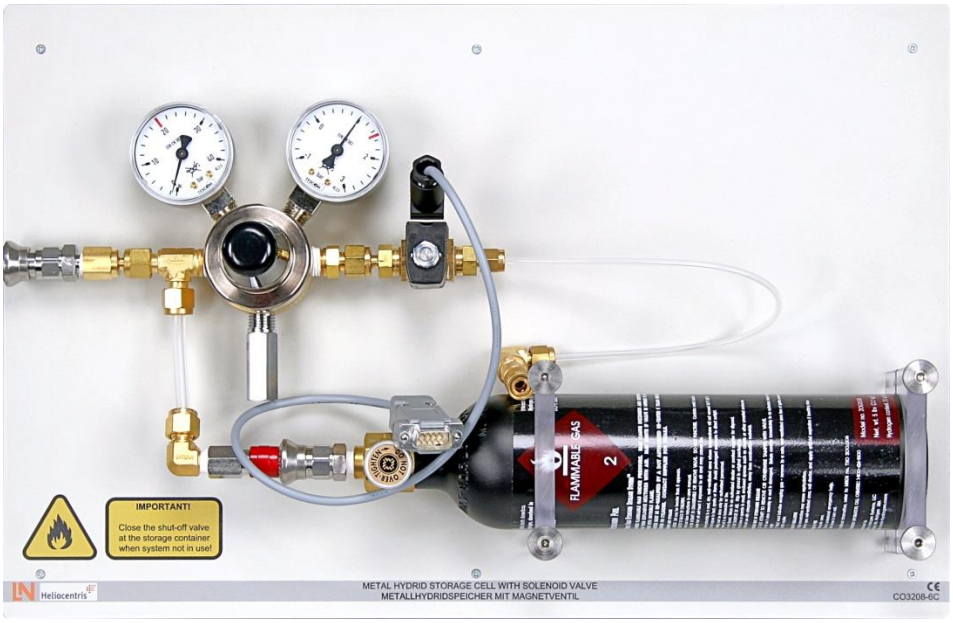
Экспериментальная панель «Электронная нагрузка» предназначена для проведения любых экспериментов по теме «Топливные элементы». Панель электронной нагрузки работает в режиме стабилизированного тока и обеспечивает поддержание неизменного установленного значения тока нагрузки независимо от величины колеблющегося напряжения. Встроенные дополнительно лампы в форме светофора выполняют функцию потребителей 12 В.



CO3208-6C

Для работы топливного элемента необходима панель металлогидридного аккумулятора с магнитным вентилем, регулятором давления и манометром. Металлогидридный аккумулятор предназначен для промежуточного хранения газообразного водорода.

Для наполнения металлогидридного аккумулятора используется электролизер.



CO3208-6D

Генератор водорода – это безопасный и удобный в применении лабораторный прибор для получения водорода методом электролиза. Он предназначен для выработки необходимого количества водорода высокой чистоты, используемого в системах с топливными элементами. Генератор водорода позволяет отказаться от применения баллонов со сжатым водородом в подобных системах, поскольку качество вырабатываемого в нем водорода достаточно высоко и оптимально для заполнения металлогидридного аккумулятора.



Вводное занятие

Ввод системы в действие

Этот раздел посвящен правилам обращения с компонентами учебной системы.

- Заправка металлогидридного аккумулятора
- Рабочий режим
- Подключение компьютера
- Вывод системы из действия

Заправка металлогидридного аккумулятора

Перед первым использованием и после длительного применения необходимо заправить металлогидридный аккумулятор водородом.

В ходе проведения данного эксперимента вы ознакомитесь с порядком заправки аккумулятора с помощью электролизера.

Подготовка к проведению эксперимента:

- Установите электролизер на стабильную поверхность и при необходимости залейте в него дистиллированную воду. Для этого откройте крышку бачка на верхней стороне электролизера, как показано на рисунке, и удалите прокладку из черного пенопласта.
  Ни в коем случае не используйте для заправки воду из-под крана!
  Не допускайте попадания в бачок электролизера инородных тел (грязи, пыли, крошек и т.п.)!
- После заливания дистиллированной воды установите на место прокладку из пенопласта и закройте крышку бачка.
- Проверьте прочное крепление всех шлангов и соединительных элементов.
- Подключите кабель электролизера к сети электропитания. После этого электролизер готов к работе.
- Соедините входящим в комплект шлангом для H_2 патрубок «H_2-OUTLET» (резьбовой разъем) с заправочным патрубком аккумулятора водорода «CO3208-6C» (штекерный разъем).

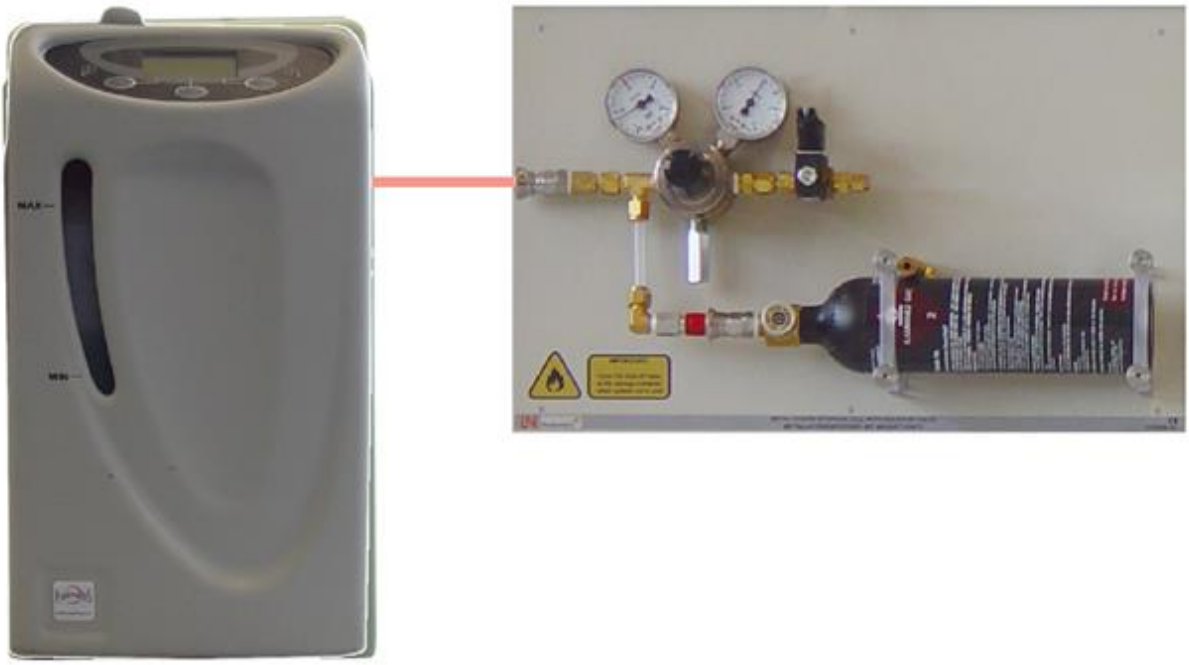


Рис. 1 – Схема сборки установки

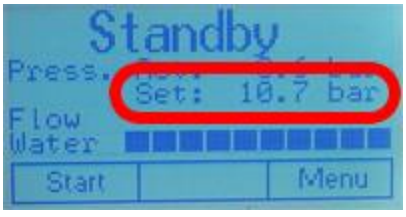
После этого базовая экспериментальная схема готова к использованию, и можно приступать к заправке системы водородом.

Порядок проведения эксперимента

1. Включите электролизер (выключатель находится на задней стороне электролизера рядом с кабелем электропитания). После инициализации и самодиагностики электролизер переходит в режим ожидания (Standby):



2. Проверьте заданное значение давления (выделенное на следующем рисунке красным цветом).



3. Если заданное значение давления составляет 10,7 бара, перейдите сразу к пункту 10. Если заданное значение давления не равно 10,7 бара, выполните все приведенные пункты по порядку.
4. Откройте меню (клавиша «Menu»).
5. Прокрутите меню (клавиша «Scroll») до выделения пункта «PressureAdjust» - «Регулирование давления» и выберите этот пункт (клавиша «Select»).



6. Установите давление на значение 10,7 бара (стрелки «вверх» и «вниз»).



7. Подтвердите установленный параметр (клавиша «Exit»).
8. Закройте меню (клавиша «Exit»).
9. После этого электролизер переходит в режим ожидания. Еще раз проверьте правильность установки заданного значения: давление должно составлять 10,7 бара. Если на дисплее высвечивается другое значение, установка оказалась безуспешной. Повторите установку заданного значения (начиная с пункта 3).



10. Запустите процесс электролиза (клавиша «Start»).
11. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.



12. После выхода электролизера на заданное значение давления откройте заправочный вентиль электролизера, находящийся на трубопроводе между электролизером и металлогидридным аккумулятором (клавиша «Open»).



13. После этого начинается заправка. По индикации «Flow» видно, какой объем водорода подается в аккумулятор для достижения заданного значения давления. Дополнительно индицируется фактическое значение давления.



14. Процесс заправки может длиться до двух часов. Металлогидридный аккумулятор считается полностью заправленным, если в течение нескольких минут в него не подается или почти не подается водород, а фактическое значение давления стабильно находится на отметке заданного значения.
15. После заправки закройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
16. Закончите процесс заправки. Для этого сначала закройте заправочный вентиль (клавиша «Close»).
17. Опять переведите электролизер в режим ожидания (клавиша «Stop»).
18. Металлогидридный аккумулятор заправлен. После этого можно выключить электролизер.

Перед выключением убедитесь в том, что электролизер переведен в режим ожидания! То же относится и к выключению электролизера путем отключения питающего напряжения (извлечения штекера из розетки)!

Контрольные вопросы

- Каково заданное значение давления, которое нужно установить для заправки металлогидридного аккумулятора?
- Какова длительность заправки аккумулятора?
- Какое обозначение имеет патрубок электролизера, к которому подключается аккумулятор водорода?

Выключение системы

1. Если система была подключена к компьютеру, и вы использовали электронную нагрузку:
    1. Выключите нагрузку на виртуальном приборе VI (переведите выключатель «LOAD» в положение «OFF») и переключите регулятор вентилятора в положение «AUTO».
    2. Выключите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «OFF»).
2. Если вы использовали в эксперименте светофор:
    1. Выключите светофор (переведите выключатель светофора в положение «OFF»).
3. Выключите панель электронной нагрузки 200 Вт (установите красный сетевой штекер в положение «0»).
4. Закройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
5. Закройте виртуальный прибор VI.
6. Выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF»).
7. Отсоедините трубопровод для водорода от панели «Пакет топливных элементов 50 Вт с преобразователем постоянного напряжения» (CO3208-6A), открыв быстроразъемную муфту.

Обязательно соблюдайте правила хранения водородного баллона. Эти правила приведены в технической документации баллона.

Лабораторная работа 1

Расход H2

Теория

Для правильного расчета систем энергоснабжения на топливных элементах нужно знать, сколько водорода необходимо подать в пакет для получения требуемой для соответствующего агрегата силы тока. Этот показатель «расхода H_2» выражается в виде объемного расхода»). Объемный расход водорода зависит от требуемой силы тока. Поэтому для наглядности представим на сравнительной диаграмме показатели объемного расхода H_2 и силы тока.

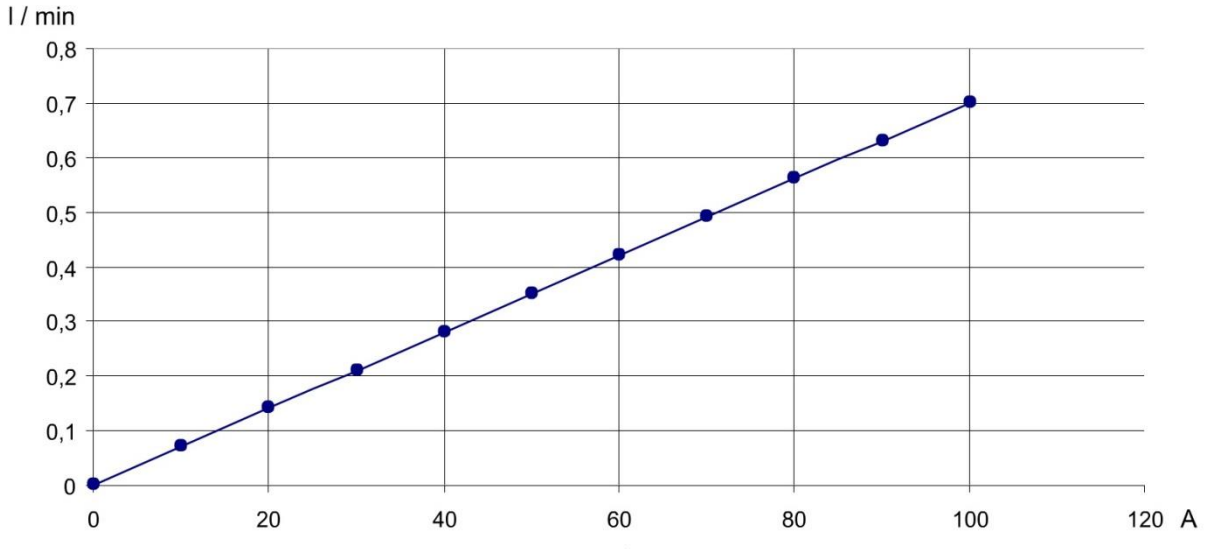


Рис. 1 – Характеристика взаимосвязи расхода водорода и силы тока

Сразу же бросается в глаза, что эта характеристика имеет форму равномерно поднимающейся линии. Таким образом, объемный расход прямо пропорционален силе тока I.

Для определения текущего расхода H_2 нужно знать, какое количество газообразного водорода расходуется пакетом в единицу времени. Этот показатель также может быть выражен через три величины – объем, массу и число молекул газа (количество вещества).

Величина	Название	Символ	Единица измерения
Количество вещества	Количественный расход вещества	$\dot{n}$	Моль/сек
Объем	Объемный расход	$\dot{V}$	$м^3$/сек
Масса (вес)	Массовый расход	$\dot{m}$	кг/сек

Количественный расход вещества рассчитывается по формуле:

$$\dot{n} = \frac{M}{t}$$

- M = молярная масса
- t = время

Из этого следует объемный расход:

$$\dot{V} = \frac{V}{t}$$

- V = объем
- t = время

Массовый расход рассчитывается следующим образом:

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

- m = масса
- t = время

Для проведения расчетов нужно знать, какова же зависимость объемного расхода от величины силы тока. Эта зависимость называется **зависимостью объемного расхода водорода от силы тока**. Используя значения, указанные на приведенной выше диаграмме, можно выразить эту зависимость в виде коэффициента:

$$\frac{\Delta \dot{V}_{H2}}{\Delta I} = \frac{0{,}7\,l}{\min \cdot 100\,A} = 0{,}007 \frac{l}{\min A} = 7 \frac{ml}{\min A}$$

Поскольку валентность в ходе катодной реакции во всех топливных элементах одинакова (z = 2), то и объемный расход водорода для получения силы тока в один ампер также одинаков во всех элементах: он всегда составляет 7 мл/мин А.

Эту зависимость можно выразить и в виде универсальной формулы. Как уже было сказано, ввиду ограниченного напряжения отдельных топливных элементов в большинстве случаев возникает необходимость подключения топливных элементов в пакет по последовательной схеме, что позволяет получить напряжение, превышающее напряжение в элементе. При последовательном подключении по всем топливным элементам течет ток одинаковой величины, поэтому во все топливные элементы нужно подавать одинаковое количество H_2. Иными словами, совокупный объемный расход возрастает пропорционально числу топливных элементов в пакете. Все остальные величины остаются неизменными

$$\frac{\dot{V}_{H2}}{I} = \frac{a \cdot V_{mn}}{z \cdot F}$$

- V_{H2} *объемный расход*
- a *число топливных элементов*
- V_{mn} *стандартный молярный объем*
- z *валентность*
- F *постоянная Фарадея*

Заменив в формуле константы соответствующими величинами, мы получим следующую простую формулу:

$$\frac{\dot{V}_{H2}}{I} = a \cdot 0{,}007 \frac{l}{\min A}$$

- a *число топливных элементов*
- V_{H2} *объемный расход*

Для расчета необходимого для работы агрегата объема водорода нужно знать параметры длительности работы и средней требуемой силы тока. А объёмный расход водорода – производная по времени искомого объёма. В итоге, получаем:

$$\dot{V}_{H2} = \frac{V_{H2}}{t} = 0{,}007 \cdot I \cdot a$$

- V_{H2} *объем водорода*
- I *сила тока*
- a *число топливных элементов*
- t *длительность работы*

Ход работы:

В ходе этого эксперимента вам предстоит исследовать зависимость расхода водорода в пакете топливных элементов от силы тока, генерируемого пакетом.

Для обеспечения должной безопасности при работе с системой ознакомьтесь с порядком ее ввода в действие и управлением.

Подготовка к проведению эксперимента:

- Подключите штекер блока питания пакета топливных элементов к розетке электросети.
- Подключите USB-кабель пакета топливных элементов к своему компьютеру.

Схема для проведения эксперимента

- Соедините между собой указанные на рисунке компоненты:

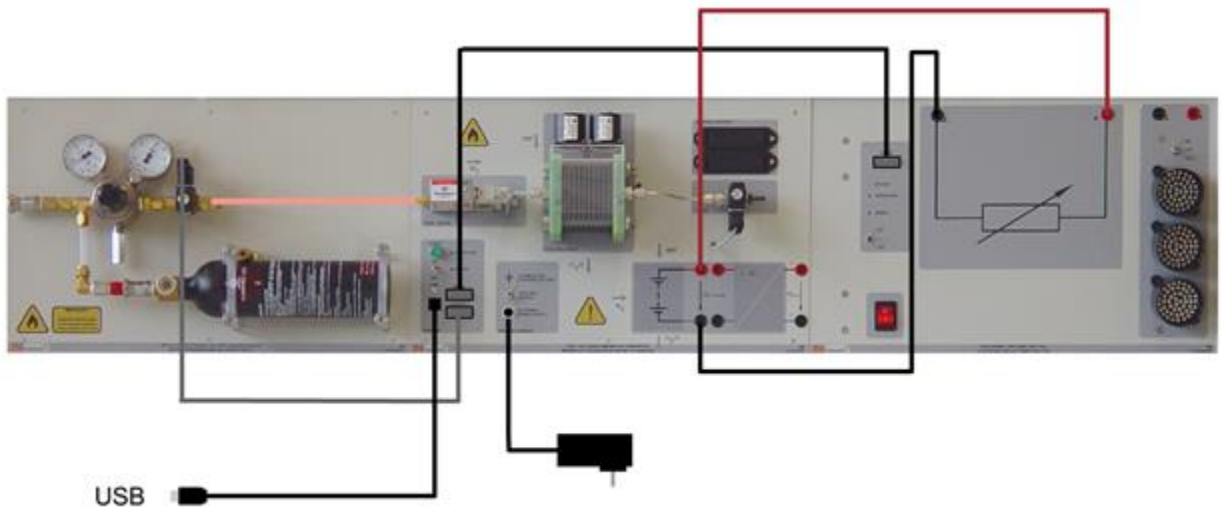


Рис. 2 – Схема подготовки лабораторной установки

После этого базовая экспериментальная схема готова к использованию, и можно приступать к работе с системой.

Порядок проведения эксперимента

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).

3. Включите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «ON»). Включается СИД «OPERATION», сигнализирующий готовность нагрузки к работе.
4. Переключите энергоснабжение пакета топливных элементов на внешнее электропитание (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «EXTERNAL POWER-SUPPLY»).
5. Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).
6. Включите виртуальный прибор (VI) «FUEL CELL CONTROL» (экранная кнопка) и установите связь с пакетом топливных элементов.
7. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.
8. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

   Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

9. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 40 °C.
   - Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 A и установите мощность вентилятора на значение 10 %.
   - Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.
   - Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.
10. Пользуясь таблицей оценки результатов эксперимента, установите значения тока нагрузки на виртуальном приборе VI (панель управления «ElectronicLoad EL200»). Учитывайте при этом, что заданное значение в графе «Loadcurrentin A» (ток нагрузки в A) может незначительно отличаться от фактического значения в графе «StackCurrent» (ток пакета). Главным в этом эксперименте является фактическое значение. После установления тока нагрузки подождите примерно одну минуту, пока объемный расход водорода не достигнет неизменного значения. После этого внесите показатель объемного расхода водорода в таблицу.
11. Составьте диаграмму, используя данные таблицы.

После окончания эксперимента выполните правильное выключение системы.

I_Stack, A	V_H2, ml/min
0.0	
1.0	
2.0	
3.0	
4.0	
5.0	
6.0	

7.0	
8.0	
9.0	
10.0	

Контрольные вопросы

- Вы построили диаграмму, используя результаты измерений. Какой вид имеет полученная характеристика?
- Как связаны объемный расход водорода и сила тока?
- Даже при работе пакета в режиме холостого хода наблюдается небольшой расход водорода. Этот расход на холостом ходу называется «величиной утечки». Каково её значение в этом эксперименте?
- По приведенной выше диаграмме можно определить объемный расход водорода в зависимости от силы тока. Чему он равен?
- Каков объемный расход водорода в зависимости от силы тока на один топливный элемент?

Лабораторная работа 2

Характеристики топливного элемента

В даннойлабораторной работебудут рассмотрены такие характеристики, как сила тока, напряжение и мощность. После этого вам предстоит самостоятельно измерить эти характеристики топливного элемента и проанализировать их.

Сила тока и напряжение

Для измерения и анализа электрических характеристик топливного элемента первоочередный интерес представляют две величины:

- электрическое напряжение, вырабатываемое топливным элементом.
- сила электрического тока, которую может давать этот элемент.

Если электрическое устройство имеет постоянное сопротивление, то верно следующее правило:сила тока прямо пропорциональна напряжению.

Упрощенно это правило можно сформулировать в следующей форме: с повышением напряжения возрастает и сила тока.

Для наглядного представления взаимозависимости двух параметров их можно отобразить на диаграмме. При этом, как правило, один параметр сознательно изменяется, а другой при этом измеряется соответствующим прибором, и на основании наблюдений делаются выводы.

Возьмем для построения диаграммы систему координат с двумя осями:

- на оси X слева направо отмечаются возрастающие значения сознательно изменяемого параметра (например, напряжения, приложенного к лампе);

- на оси Y снизу вверх отмечаются изменяющиеся значения наблюдаемого параметра (например, силы тока, измеренной при различных значениях напряжения).

Каждая пара измеренных значений имеет только одну точку пересечения. Путем соединения всех точек пересечения можно получить характеристику исследуемого предмета рассмотрения, отражающую изменение его параметров (например, вольт-амперную характеристику лампы накала). Проанализировав эту характеристику, можно сделать определенные выводы и заключения.

Посмотрев на эту вольт-амперную диаграмму лампы накала, можно увидеть, что сопротивление лампы возрастает не равномерно, а только до напряжения порядка 0,4 В и после этого практически не изменяется:

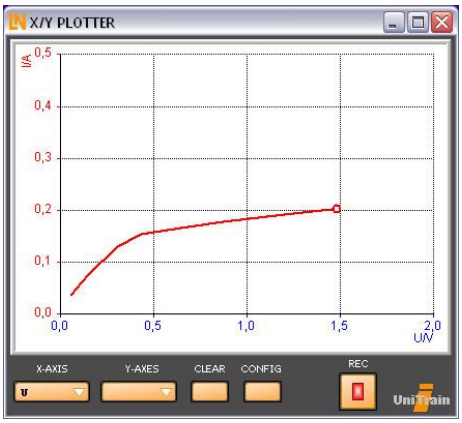


Рис.1 – Вольт-амперная характеристика лампы

Это означает, что при низких значениях напряжения сила тока сначала резко возрастает, то есть электрическое сопротивление лампы довольно невысоко.

При более высоких значениях напряжения сила тока возрастает лишь незначительно, то есть лампа имеет относительно высокое электрическое сопротивление.

Мощность

Понятие «мощность» используется не только в техническом значении, например, «в строй введены новые мощности». Но в физико-технической сфере термин «мощность» имеет однозначное определение. В физике оно гласит: мощность (P) – это работа (Вт), совершенная в единицу времени (t).

Электрическая мощность рассчитывается по параметрам силы тока (I) и напряжения (U):

$$P_{el} = U \cdot I$$

Ход работы

В этом эксперименте вам предстоит исследовать зависимость напряжения на клеммах и электрической мощности пакета топливных элементов от нагрузки.

Для обеспечения должной безопасности при работе с системой ознакомьтесь с порядком ее ввода в действие и управлением.

Подготовка к проведению эксперимента:

- Подключите штекер блока питания пакета топливных элементов к розетке электросети.
- Подключите USB-кабель пакета топливных элементов к своему компьютеру.

Схема для проведения эксперимента

- Соедините между собой указанные на рисунке компоненты:

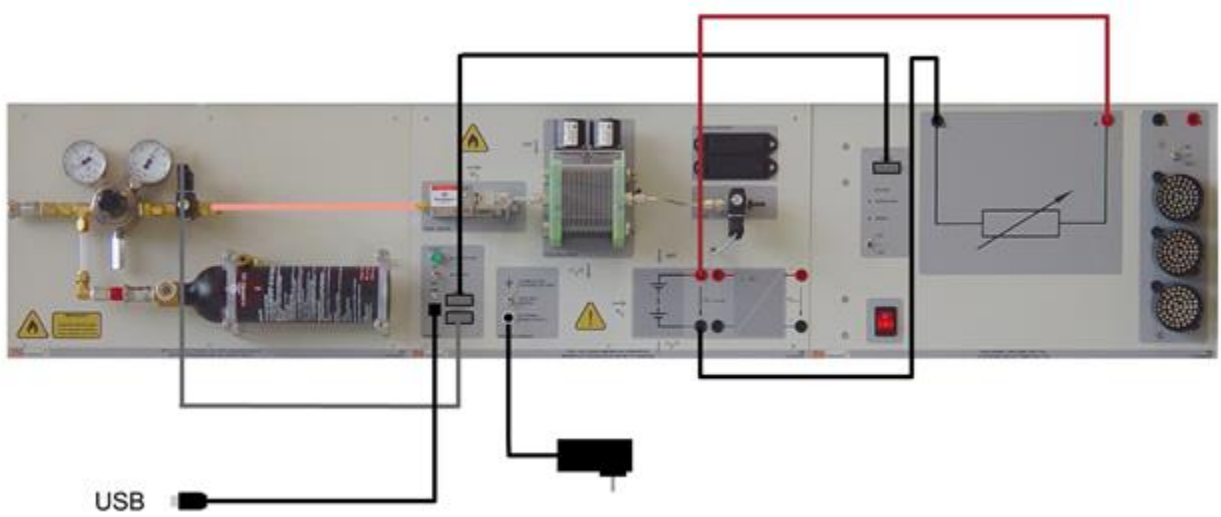


Рис. 2 – Схема подготовки лабораторной установки

Порядок проведения эксперимента

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).
3. Включите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «ON»). Включается СИД «OPERATION», сигнализирующий готовность нагрузки к работе.
4. Переключите энергоснабжение пакета топливных элементов на внешнее электропитание (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «EXTERNAL POWER-SUPPLY»).
5. Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).
6. Включите виртуальный прибор „FUEL CELL CONTROL» (экранная кнопка) и установите связь с пакетом топливных элементов.
7. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.
8. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

   Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

9. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 40 °C.

- Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 A и установите мощность вентилятора на значение 10 %.
- Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.
- Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.

10. Пользуясь таблицей оценки результатов эксперимента, установите значения тока нагрузки на виртуальном приборе VI (панель управления «ElectronicLoad EL200»). Учитывайте при этом, что заданное значение в графе «Loadcurrentin A» (ток нагрузки в A) может незначительно отличаться от фактического значения в графе «StackCurrent» (ток пакета). Главным в этом эксперименте является фактическое значение. Занесите значения напряжения на клеммах UStack в таблицу.
11. Рассчитайте для каждого значения силы тока результирующую электрическую мощность пакета P_{Stack} и занесите данные в таблицу в пункте оценки результатов эксперимента.
12. Составьте диаграмму, используя данные таблицы.

После окончания эксперимента выполните правильное выключение системы.

I_Stack, A	U_Stack, V
0.0	
0.2	
0.5	
1.0	
1.5	
2.0	
3.0	
5.0	
7.5	
10.0	

I_Stack, A	P_Stack, W
0.0	
0.2	
0.5	
1.0	
1.5	
2.0	
3.0	
5.0	
7.5	
10.0	

Проанализируйте форму характеристик.

В отчёте укажите следующие результаты, полученные вами из графиков:

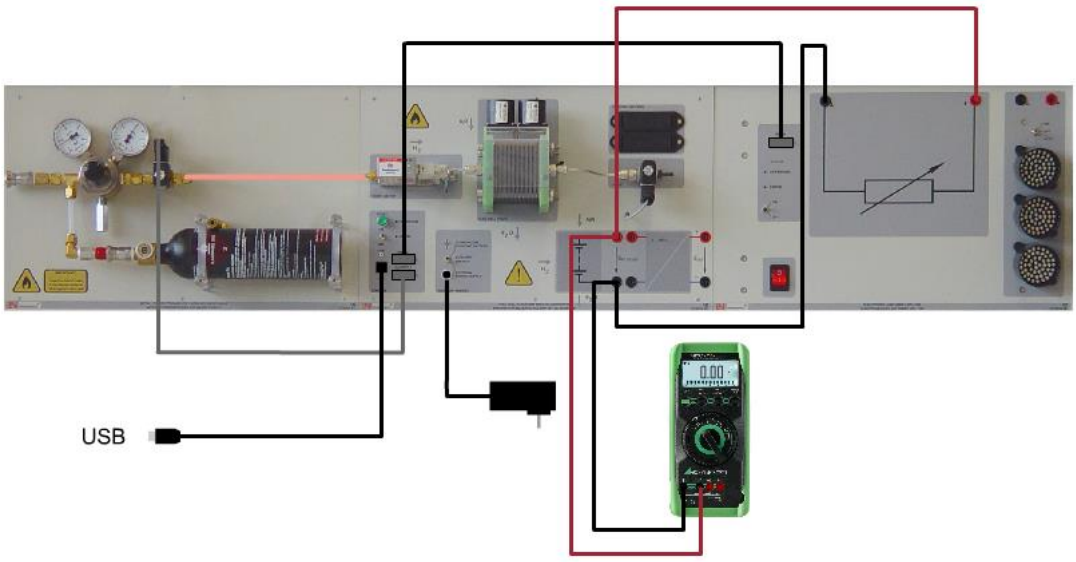
- Напряжение холостого хода;
- Максимальная сила тока пакета;
- Максимальная электрическая мощность пакета.

Контрольные вопросы

- Чем можно объяснить форму вольт-амперной характеристики пакета ТЭ?
- Чем можно объяснить форму ватт-амперной характеристики пакета ТЭ?
- Какой должна быть минимальная сила тока пакета топливных элементов для обеспечения питания электрической печи, потребляющей 2 кВт при 100 В?
- Как, в контуре тока с потребителем, имеющим постоянное электрическое сопротивление, соотносятся между собой сила тока и напряжение?

Лабораторная работа 3

Внутреннее сопротивление



Порядок проведения эксперимента

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).
3. Включите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «ON»). Включается СИД «OPERATION», сигнализирующий готовность нагрузки к работе.
4. Переключите энергоснабжение пакета топливных элементов на внешнее электропитание (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «EXTERNAL POWER-SUPPLY»).
5. Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).

6. Включите виртуальный прибор «FUEL CELL SOFTWARE» (экранная кнопка ) и установите связь с пакетом топливных элементов.

7. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.

8. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

9. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 40 °C.
    - *Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 А и установите мощность вентилятора на значение 10 %.*
    - *Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.*
    - *Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.*

10. Пользуясь таблицей оценки результатов эксперимента, установите значения тока нагрузки на виртуальном приборе V_I (панель управления «ElectronicLoad EL200»). Учитывайте при этом, что заданное значение в графе «Loadcurrentin A» (ток нагрузки в А) может незначительно отличаться от фактического значения в графе «StackCurrent» (ток пакета). Главным в этом эксперименте является фактическое значение. Спустя примерно 15 секунд запишите в таблицу параметры напряжения пакета U_{Stack} (индицируется на виртуальном приборе V_I) и напряжения на клеммах UFC STACK (индицируется на внешнем измерительном приборе).

11. Составьте диаграмму, используя данные таблицы.

12. Ответьте на вопросы по результатам эксперимента.

I_Stack, A	U_Stack, V	U_FC Stack, V
0.0		
0.2		
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		
3.0		
5.0		
7.5		
10.0		

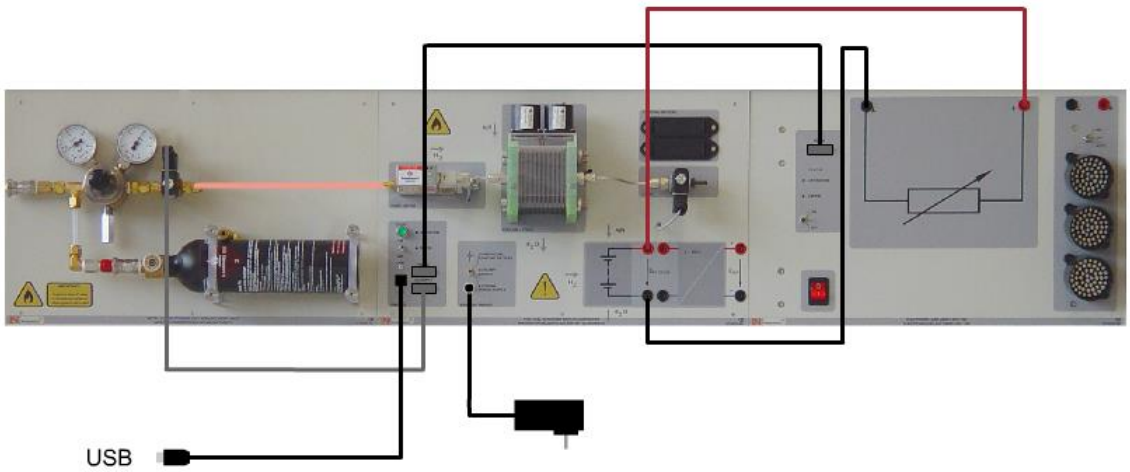
Контрольные вопросы:

- Какой вид имеют обе характеристики при силе тока ниже 2 А?

- Какой вид имеют обе характеристики при силе тока выше 2 А?
- В какой форме проявляется потеря мощности?

Лабораторная работа 4

Температура



Порядок проведения эксперимента

В ходе этого эксперимента пакет топливных элементов намеренно выводится из режима «нормальной» рабочей температуры. В ходе проведения измерений следите за тем, чтобы температура не отличалась от заданного значения больше чем на 2 °C. Если температура пакета достигнет 50 °C или превысит эту отметку, система должна быть выключена и может быть повторно включена только после охлаждения пакета (предохранительное отключение).

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).
3. Включите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «ON»). Включается СИД «OPERATION», сигнализирующий готовность нагрузки к работе.
4. Переключите энергоснабжение пакета топливных элементов на внешнее электропитание (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «EXTERNAL POWER-SUPPLY»).
5. Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).
6. Включите виртуальный прибор «FUEL CELL SOFTWARE» (экранная кнопка) и установите связь с пакетом топливных элементов.
7. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.
8. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

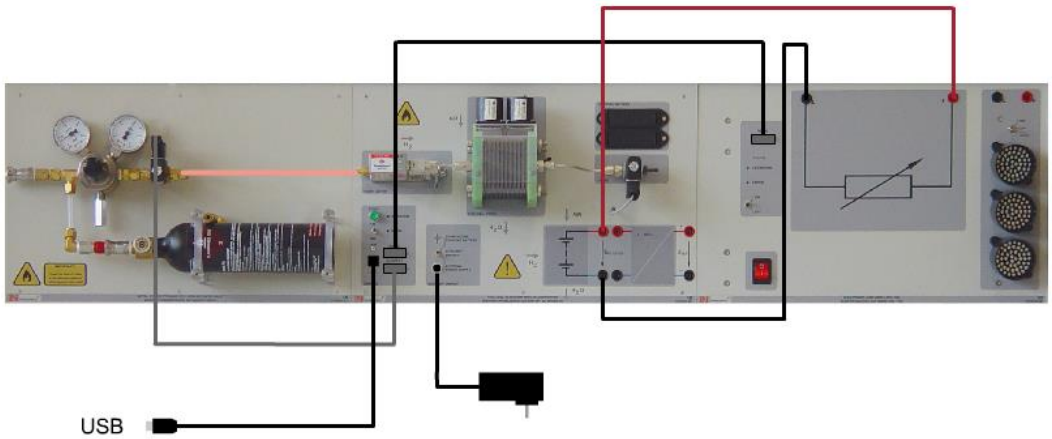
9. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 28 °C.
    - *Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 А и установите мощность вентилятора на значение 10 %.*
    - *Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.*
    - *Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.*
10. Пользуясь таблицей оценки результатов эксперимента, установите значения тока нагрузки на виртуальном приборе VI (панель управления «ElectronicLoad EL200»). Учитывайте при этом, что заданное значение в графе «Loadcurrentin A» (ток нагрузки в А) может незначительно отличаться от фактического значения в графе «StackCurrent» (ток пакета). Главным в этом эксперименте является фактическое значение. Быстро запишите напряжение пакета UStack (индицируется на виртуальном приборе VI) в таблицу. Следите за температурой пакета: если пакет сильно нагрелся, перед проведением следующего измерения его нужно охладить, как описано выше.
11. Проведите аналогичные измерения при температуре пакета порядка 44 °C. При этом опять следите за тем, чтобы во время проведения измерений температура пакета ненамного отличалась от заданного значения. При необходимости повысьте или понизьте температуру, как описано выше.
12. Составьте диаграмму, используя данные таблицы.
13. Ответьте на вопросы по результатам эксперимента.

Контрольные вопросы:

- Какие выводы можно сделать при сравнении обеих характеристик?
- Измерения напряжения проводились при одинаковой силе тока. Следовательно, при повышении температуры пакета что происходило с мощностью пакета?

Лабораторная работа 5

Подача воздуха



Порядок проведения эксперимента

В ходе этого эксперимента пакет топливных элементов намеренно переводится в режим недостатка кислорода. Для этого вручную снижается скорость вращения вентилятора, в результате чего ухудшается охлаждение пакета, и он быстро нагревается (особенно при высоких значениях силы тока). Поэтому измерения при низкой скорости вращения вентилятора нужно проводить как можно быстрее. Если температура пакета достигнет 50 °C или превысит эту отметку, система должна быть выключена и может быть повторно включена только после охлаждения пакета (предохранительное отключение).

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).
3. Включите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «ON»). Включается СИД «OPERATION», сигнализирующий готовность нагрузки к работе.
4. Переключите энергоснабжение пакета топливных элементов на внешнее электропитание (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «EXTERNAL POWER-SUPPLY»).
5. Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).
6. Включите виртуальный прибор „FUEL CELL SOFTWARE» (экранная кнопка) и установите связь с пакетом топливных элементов.
7. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.
8. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

9. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 40 °C.
    - *Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 A и установите мощность вентилятора на значение 10 %.*
    - *Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.*
    - *Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.*
10. Установите регулировку скорости вращения вентилятора на виртуальном приборе VI на режим «АВТО».
11. Пользуясь таблицей оценки результатов эксперимента, установите значения тока нагрузки на виртуальном приборе VI (панель управления „Electronic Load EL200»). Учитывайте при этом, что заданное значение в графе «Load current in A» (ток нагрузки в A) может незначительно отличаться от фактического значения в графе «Stack Current» (ток пакета). Главным в этом эксперименте является фактическое значение. Быстро запишите напряжение пакета UStack (индицируется на виртуальном приборе VI) в таблицу. Следите за температурой пакета: если пакет сильно нагрелся, перед проведением следующего измерения его нужно охладить, как описано выше.
12. Теперь вручную установите скорости вращения вентилятора на виртуальном приборе VI на значение 6 %.
13. Проведите те же самые измерения при пониженной скорости вращения вентилятора и внесите измеренные значения в таблицу оценки результатов эксперимента. При этом опять следите за тем, чтобы во время проведения измерений температура пакета ненамного отличалась от заданного значения. При необходимости повысьте или понизьте температуру, как описано выше.
14. После окончания измерений опять установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО».
15. Теперь рассчитайте мощность пакета при работе с различными параметрами и внесите полученные значения в таблицу оценки результатов эксперимента.
16. Составьте диаграммы, используя данные таблицы.
17. Ответьте на вопросы по результатам эксперимента.

I_Stack, A	U_Stack, V (Fan «AUTO»)	U_Stack, V (Fan «6%»)
0.0		
0.2		
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		
3.0		
5.0		
7.5		
8.0		
8.10		
8.20		

8.30		
8.40		
8.50		
10.00		

При пониженной скорости вращения вентилятора повышение силы тока оказывается невозможным, поскольку управляющая электроника отключает пакет при падении напряжения на клеммах ниже 4,0 В. Для регистрации максимально возможной в этом случае силы тока был сокращен шаг результатов измерений в диапазоне от 8,0 до 8,5 А. Клетки для недостижимых значений силы тока вы можете не заполнять.

При автоматическом регулировании скорости вращения вентилятора измерения в диапазоне от 8,0 до 8,5 А проводить не нужно.

Контрольные вопросы:

- Какую функцию выполняют оба вентилятора в рассматриваемом пакете?
- Какова причина внезапного падения напряжения на клеммах при недостаточной подаче воздуха?
- Как проявляется внутреннее сопротивление источников питания при работе в нормальном режиме?

Лабораторная работа 6

Коэффициент полезного действия пакета

Весь смысл использования топливных элементов в автомобилях типа F-CELL состоит в том, чтобы использовать вырабатываемую ими электрическую энергию. Все остальные выходные величины играют второстепенную роль и, собственно говоря, являются нежелательными. Особенно «мешает» вырабатываемое «побочно» тепло, для отвода которого требуется большой объемный расход воздуха. Это технологическое тепло полностью бесполезно, но без этого **сопутствующего** тепла выработка электрической энергии не возможна.

В наших топливных элементах с протон-обменной мембраной входными величинами являются H_2 и O_2. H_2 обладает определенной теплотворной способностью. Зная, какое количество H_2 сжигается за определенное время, можно рассчитать значение мощности. Однако, к сожалению, не вся эта мощность преобразуется в электрическую мощность, поскольку в ходе работы топливных элементов выделяются тепло и вода, отбирающие часть вводимой мощности.

Для расчета **коэффициента полезного действия** топливного элемента нужно разделить отдаваемую им полезную (электрическую) мощность на вводимую мощность. В результате деления получается число без указания единиц измерения, которое всегда имеет значение между 0 и 1.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

- η = коэффициент полезного действия (греческая буква «эта»)
- P_2 = полезная мощность
- P_1= вводимая мощность

Наряду с этим, коэффициент полезного действия можно рассчитать и путем деления отводимой работы (полезной энергии) на вводимую энергию:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1}$$

- η = коэффициент полезного действия
- W_2 = полезная работа
- W_1 = вводимая работа

Иногда КПД (показатель «эта») указывается в процентном выражении. Для этого он умножается на 100 %. Следовательно, коэффициент полезного действия никогда не может превышать 100 %.

Расчет КПД по мощности

Если для пакета известен объемный расход водорода, для расчета его коэффициента полезного действия можно использовать показатель мощности. Электрическая полезная мощность вычисляется по следующей формуле:

$$P_{el} = U \cdot I$$

- P_{el} = электрическая мощность (полезная мощность)
- U = электрическое напряжение
- I = электрический ток.

Вводимая химическая мощность рассчитывается по теплотворной способности водорода и объемному расходу водорода:

$$P_{ch} = H_i \cdot \dot{V}_{H2}$$

- P_{ch} = химическая мощность
- H_i = теплотворная способность водорода
- V. = объемный расход водорода.

Значение теплотворной способности водорода можно найти в соответствующих справочниках. Для нашего курса этот показатель рекомендуется пересчитать в миллилитры:

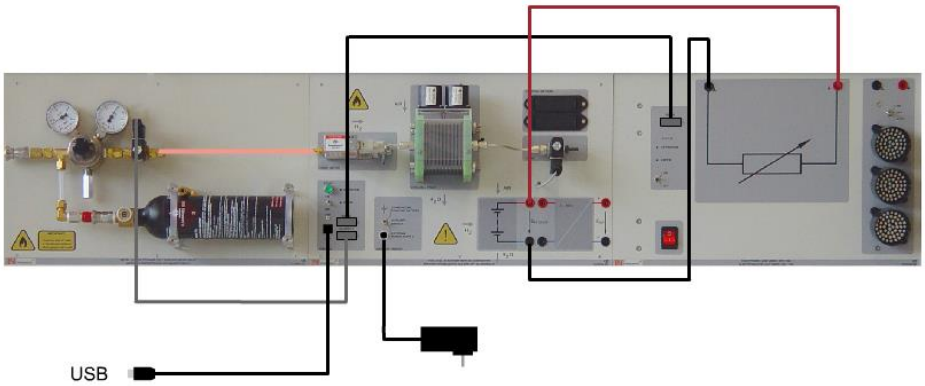
$$H_{i\,H2} = 10{,}8 \frac{MJ}{m^3} = 10{,}8 \frac{kJ}{l} = 10{,}8 \frac{J}{ml}$$

В итоге коэффициент полезного действия вычисляется по формуле:

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{ch}} = \frac{U \cdot I}{H_{i\,H2} \cdot \dot{V}_{H2}}$$

- P_{el} = электрическая мощность (полезная мощность)
- U = электрическое напряжение
- I = электрический ток
- P_{ch} = химическая мощность
- $H_{i\,H2}$ = теплотворная способность водорода
- $V._{H2}$ = объемный расход водорода.

Ход работы:



Порядок проведения эксперимента

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).
3. Включите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «ON»). Включается СИД «OPERATION», сигнализирующий готовность нагрузки к работе.
4. Переключите энергоснабжение пакета топливных элементов на внешнее электропитание (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «EXTERNAL POWER-SUPPLY»).
5. Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).
6. Включите виртуальный прибор „FUEL CELL SOFTWARE» (экранная кнопка) и установите связь с пакетом топливных элементов.
7. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.
8. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

9. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 40 °C.
    - *Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 А и установите мощность вентилятора на значение 10 %.*
    - *Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.*
    - *Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.*

10. Пользуясь таблицей оценки результатов эксперимента, установите значения тока нагрузки на виртуальном приборе VI (панель управления «Electronic Load EL200»). Учитывайте при этом, что заданное значение в графе «Load current in A» (ток нагрузки в А) может незначительно отличаться от фактического значения в графе «Stack Current» (ток пакета). Главным в этом эксперименте является фактическое значение. Спустя примерно 15 секунд запишите в таблицу параметры напряжения пакета UStack и объемного расхода водорода VH2 (индицируется на виртуальном приборе VI).

11. После этого проведите расчеты и внесите в таблицу соответствующие значения мощности и коэффициента полезного действия.

12. Составьте диаграмму, используя данные таблицы.

13. Ответьте на вопросы по результатам эксперимента.

После окончания эксперимента выполните правильное выключение системы. Порядок выключения описан в разделе «Выключение системы».

I_Stack, A	U_Stack, V	P_Stack, W	V_H2, mi/min	eta
0.0				
0.2				
0.5				
1.0				
1.5				
2.0				
3.0				
5.0				
7.5				
10.00				

Контрольные вопросы:

- При какой силе тока достигается максимальный коэффициент полезного действия?
- При какой силе тока достигается максимальная выводимая мощность?

Лабораторная работа 7

Коэффициент использования тока и напряжения

Коэффициент использования напряжения – это отношение реального напряжения на клеммах U_{Stack} к теоретически возможному напряжению. Теоретически возможное напряжение отдельно взятого топливного элемента определяется электрохимическими процессами, протекающими при расходе H_2. Это так называемое теоретическое напряжение покоя (или эталонное напряжение обратимого термодинамического процесса) может быть рассчитано по калорийности или теплотворной способности H_2. В наших расчетах мы используем теплотворную способность водорода, величина которой может быть найдена в справочной

литературе: $U_{rev\ Hu}$ = 1,254 В. Это напряжение действительно для одного топливного элемента. Но поскольку пакет состоит, как правило, из нескольких подключенных последовательно топливных элементов, в формулу нужно ввести число топливных элементов. В итоге формула для расчета коэффициента использования напряжения будет иметь следующий вид:

$$\eta_U = \frac{U_{Stack}}{a \cdot U_{rev\,H2}}$$

- η_U= коэффициент использования напряжения
- U_{Stack} = напряжение на клеммах
- a = число топливных элементов в пакете
- $U_{rev\ H2}$ = теоретическое напряжение покоя (1,254 В)

Под коэффициентом использования тока η_I подразумевается соотношение реальной силы тока I_{Stack}, генерируемой пакетом, и теоретически возможной силы тока I_{th}.

$$\eta_I = \frac{I_{Stack}}{I_{th}}$$

- *η_I = коэффициент использования тока*
- *I_{Stack} = реальная сила тока*
- *I_{th} = теоретическая сила тока*

Реальная сила тока I_{Stack} поддается измерению. Она, естественно, зависит от соответствующей нагрузки. А значение I_{th} может быть получено только путем расчетов. Оно зависит от объемного расхода водорода и количества действующих топливных элементов в пакете. Наряду с этим в уравнение вводятся валентность z, постоянная Фарадея F и молярный стандартный объем. Из раздела «Расчет расхода H2» уже известна расчетная формула:

$$\dot{V}_{H2} = \frac{V_{H2}}{t} = \frac{V_{mn} \cdot I \cdot a}{z \cdot F}$$

- *V_{H2} объемный расход водорода*
- *V_{H2} потребленный объем водорода*
- *I сила тока*
- *a число топливных элементов*
- *t длительность работы*
- *V_{mn} стандартный молярный объем*
- *z валентность*
- *F постоянная Фарадея*

Подставим в эту формулу значения постоянных:

$$\dot{V}_{H2} = \frac{V_{H2}}{t} = 0{,}007 \cdot I \cdot a$$

- *V_{H2} объемный расход водорода*
- *V_{H2} потребленный объем водорода*
- *I сила тока*
- *a число топливных элементов*
- *t длительность работы*

После переноса I в левую часть получаем следующую формулу:

$$I_{th} = \frac{\dot{V}_{H2}}{0{,}007 \frac{l}{\min \cdot A} \cdot a}$$

- *V_{H2} объемный расход водорода*
- *I_{th} теоретическая сила тока*
- *a число топливных элементов*

Общий коэффициент полезного действия топливного элемента или пакета топливных элементов рассчитывается путем умножения η_I на η_U:

$$\eta = \eta_I \cdot \eta_U$$

- η *коэффициент полезного действия*
- η_I *коэффициент использования тока*
- η_U *коэффициент использования напряжения*

Подготовка к проведению эксперимента:

В этом эксперименте можно использовать результаты измерений, полученные в ходе эксперимента «Коэффициент полезного действия пакета». Проведения дополнительных измерений не требуется.

Полученные результаты измерений:

I_Stack, A	U_Stack, V	P_Stack, W	V_H2, mi/min	eta
0.0				
0.2				
0.5				
1.0				
1.5				
2.0				
3.0				
5.0				
7.5				
10.00				

Порядок проведения эксперимента

1. Используя результаты измерений, полученные в ходе эксперимента «Коэффициент полезного действия пакета», вычислите коэффициенты использования тока в различных режимах нагрузки. Внесите полученные данные в таблицу оценки результатов эксперимента.

Ниже приведена формула для расчета теоретической силы тока:

$$I_{th} = \frac{\dot{V}_{H2}}{0{,}007 \frac{l}{\min \cdot A} \cdot a}$$

- V_{H2} *объемный расход водорода*
- I_{th} *теоретическая сила тока*
- a *число топливных элементов*

Коэффициент использования тока рассчитывается по формуле:

$$\eta_I = \frac{I_{Stac}}{I_{th}}$$

- η_I = *коэффициент использования тока*
- I_{Stack} = *реальная сила тока*
- I_{th} = *теоретическая сила тока*

1. Теперь, используя результаты измерений, полученные в ходе эксперимента «Коэффициент полезного действия пакета», вычислите коэффициенты использования напряжения в различных режимах нагрузки и внесите полученные данные в таблицу оценки результатов эксперимента.

Коэффициент использования напряжения рассчитывается по формуле:

$$\eta_U = \frac{U_{Stack}}{a \cdot U_{rev\,H2}}$$

- η_U = *коэффициент использования напряжения*
- U_{Stack} = *напряжение на клеммах*
- a = *число топливных элементов в пакете*
- $U_{rev\,H2}$ = *теоретическое напряжение покоя(1,254 V)*

1. После этого рассчитайте на основании полученных результатов коэффициенты полезного действия пакета ($эта_{calc}$) в различных режимах нагрузки и занесите вычисленные значения в таблицу.

Общий коэффициент полезного действия рассчитывается по формуле:

$$\eta = \eta_I \cdot \eta$$

- η *коэффициент полезного действия*
- η_I *коэффициент использования тока*
- η_U *коэффициент использования напряжения*

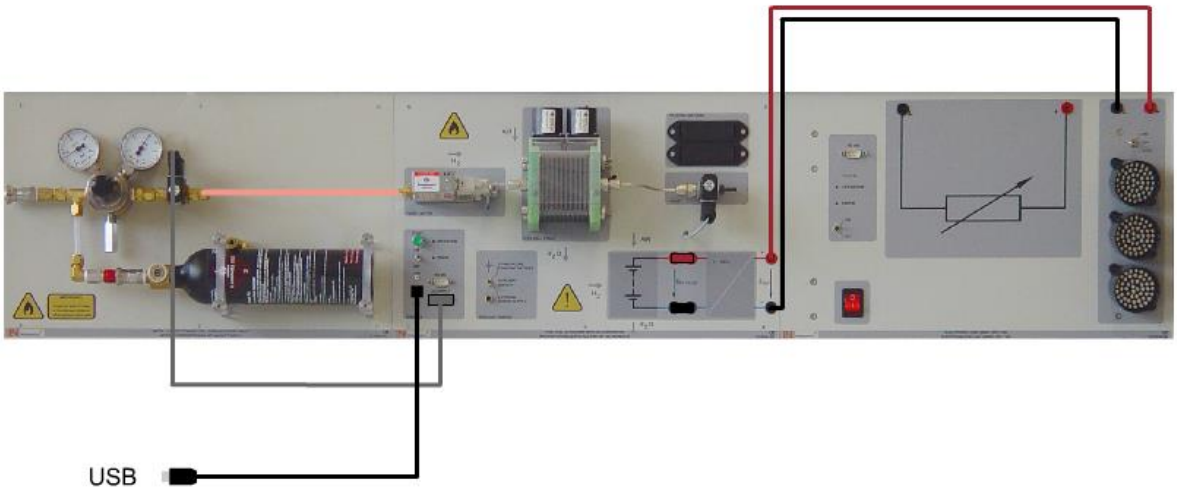
2. Составьте диаграмму, используя данные таблицы, и ответьте на вопросы по результатам эксперимента.

После окончания эксперимента выполните правильное выключение системы. Порядок выключения описан в разделе «Выключение системы».

I_Stack, A	U_Stack, V	eta_I	eta_U	Eta_calc
0.0				
0.2				
0.5				
1.0				
1.5				
2.0				
3.0				
5.0				
7.5				
10.00				

Лабораторная работа 8

Электроснабжение светофора



Порядок проведения эксперимента

Для проведения этого эксперимента температура пакета должна составлять около 40 °C. Если температура будет существенно ниже 40 °C, самым быстрым способом повышения температуры топливного элемента является подключение к контуру электронной нагрузки (например, как описано в эксперименте «Коэффициент полезного действия пакета» и во многих других экспериментах). При работе с холодным топливным элементом описанный в данном эксперименте способ достижения требуемой температуры может занять много времени.

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).
3. Переключите энергообеспечение пакета на внутреннее электроснабжение (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «STAND-ALONE STARTING BATTERY»).
4. Выключите все СИДы светофора (переведите выключатель светофора в положение «OFF»).
5. Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).
6. Включите виртуальный прибор «FUEL CELL SOFTWARE» (экранная кнопка) и установите связь с пакетом топливных элементов.
7. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.
8. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

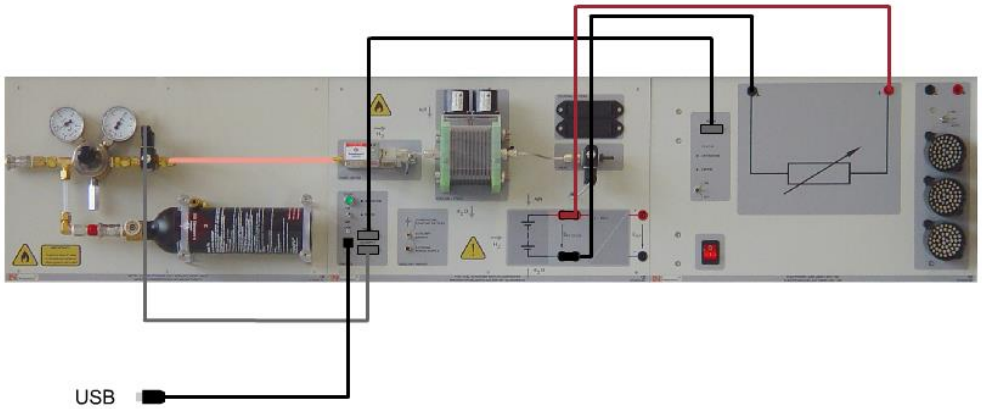
9. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 40 °C.
    - *Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 А и установите мощность вентилятора на значение 10 %.*
    - *Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.*
    - *Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.*
10. Режимы работы светофора устанавливаются с помощью выключателя светофора. Внесите в таблицу оценки результатов эксперимента значения силы тока, напряжения и мощности. Величина полезной мощность P_{usable} индицируется на виртуальном приборе V_I в поле «Usable Power», величина собственного потребления $P_{parasitic}$ – в поле «Parasitic Load».
11. Рассчитайте значения мощности пакета по напряжению на клеммах и силе тока пакета для отдельных фаз светофора.
12. Составьте диаграмму, используя данные таблицы.
13. Ответьте на вопросы по результатам эксперимента.

LEDs	U_Stack, V	I_Stack, A	P_Parasitic, W	P_usable, W	P_Stack, W
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Фаза светофора	**СИДы**
Все СИДы выключены	1
Зеленый	2
Желтый	3
Красный	4
Красный и желтый	5
Все СИДы включены	6

Лабораторная работа 9

Анализ собственного потребления



Порядок проведения эксперимента

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).
3. Включите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «ON»). Включается СИД «OPERATION», сигнализирующий готовность нагрузки к работе.

- Переключите энергообеспечение пакета на **внутреннее электроснабжение** (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «STAND-ALONE STARTING BATTERY»).
- Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).

1. Включите виртуальный прибор „FUEL CELL SOFTWARE» (экранная кнопка) и установите связь с пакетом топливных элементов.
2. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.
3. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

4. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 40 °C.
    - *Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 A и установите мощность вентилятора на значение 10 %.*
    - *Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.*
    - *Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.*

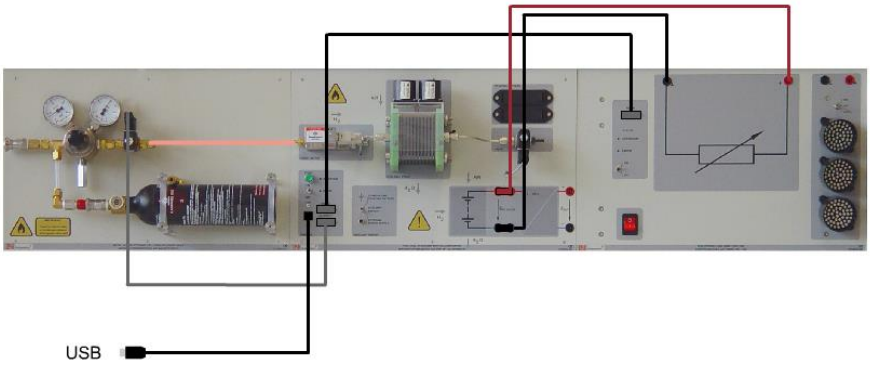
5. Пользуясь таблицей оценки результатов эксперимента, установите значения тока нагрузки на виртуальном приборе VI (панель управления «Electronic Load EL200»). Учитывайте при этом, что заданное значение в графе «Load current in A» (ток нагрузки в A) может незначительно отличаться от фактического значения в графе «Stack Current» (ток пакета). Главным в этом эксперименте является фактическое значение. Спустя примерно 15 секунд запишите в таблицу параметры напряжения пакета UStack, силы тока пакета IStack, собственного потребления мощности Pparasitic и мощности нагрузки резистора PR (поле «Power» на виртуальном приборе VI).
6. Рассчитайте требуемые значения мощности и внесите их в соответствующие графы таблицы.
7. Составьте диаграмму, используя данные таблицы.
8. Ответьте на вопросы по результатам эксперимента.

После окончания эксперимента выполните правильное выключение системы. Порядок выключения описан в разделе «Выключение системы».

I_Stack, A	U_Stack, V	P_Parasitic, W	P_R, W	P_Stack, W
1.0				
2.0				
3.0				
4.0				
5.0				
6.0				
7.0				
8.0				
9.0				
10.0				

Лабораторная работа 10

КПД независимой от сети системы электроснабжения на топливных элементах



Порядок проведения эксперимента

1. Откройте вентиль на металлогидридном аккумуляторе.
2. Включите панель электронной нагрузки 200 Вт (переведите красный сетевой штекер в положение «I»).
3. Включите электронную нагрузку (переведите выключатель на панели управления «Status» в положение «ON»). Включается СИД «OPERATION», сигнализирующий готовность нагрузки к работе.

- Переключите энергообеспечение пакета на **внутреннее электроснабжение** (переведите выключатель «AUXILIARY ENERGY» в положение «STAND-ALONE STARTING BATTERY»).
- Включите пакет (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «ON»).

1. Включите виртуальный прибор „FUEL CELL SOFTWARE» (экранная кнопка) и установите связь с пакетом топливных элементов.
2. Включите рабочий режим пакета (клавишей «START» на панели управления «CONTROL»). После этого программное обеспечение начнет показывать разные рабочие параметры пакета топливных элементов.
3. После инициализации постоянно горит индикация «OPERATION». Панель топливных элементов начинает вырабатывать электричество.

Если при инициализации возникает сбой (например, при наличии воздуха в трубопроводах), выключите пакет топливных элементов (переведите выключатель на панели управления «CONTROL» в положение «OFF») и повторите операции, начиная с пункта 5.

4. Проверьте по виртуальному прибору VI температуру пакета. Она должна составлять около 40 °C.
    - *Если температура пакета будет ниже 40 °C, подайте на пакет ток около 5 A и установите мощность вентилятора на значение 10 %.*
    - *Если температура пакета будет существенно выше 40 °C, переключите пакет на холостой ход и установите мощность вентилятора на значение 100 %.*
    - *Через некоторое время, когда нужная температура установится, переключите пакет на холостой ход и установите скорость вращения вентилятора в режим «АВТО». После этого продолжите эксперимент.*
5. Пользуясь таблицей оценки результатов эксперимента, установите значения тока нагрузки на виртуальном приборе VI (панель управления „Electronic Load EL200»). Учитывайте при этом, что заданное значение в графе «Load current in A» (ток нагрузки в A) может незначительно отличаться от фактического значения в графе «Stack Current» (ток пакета). Главным в этом эксперименте является фактическое значение. Примерно спустя 30 секунд занесите требуемые значения измерений в таблицу.
6. Рассчитайте требуемые значения мощности и внесите их в соответствующие графы таблицы.
7. Составьте диаграмму, используя данные таблицы.
8. Ответьте на вопросы по результатам эксперимента.

После окончания эксперимента выполните правильное выключение системы. Порядок выключения описан в разделе „Выключение системы».

I_Stack, A	U_Stack, V	V_H2, ml/min	P_R, W	eta_ Stack	Eta_System
0.7					
1.2					
1.5					
2.0					
3.0					
4.0					
5.0					
6.0					
8.0					
10.0					

Название	**Значение**
P_R	мощность на нагрузочном сопротивлении (полезная мощность)
eta_Stack	коэффициент полезного действия пакета
eta_System	коэффициент полезного действия системы автономного электроснабжения и системы регулирования напряжения (коэффициент полезного действия системы)
eta	общий коэффициент полезного действия

Значение P_R можно считать прямо на виртуальном приборе VI. А коэффициент полезного действия пакета eta_Stack рассчитывается известным вам методом.

Коэффициент полезного действия системы eta_System рассчитывается в данном случае по показателям P_R (то есть по полезной мощности) и вводимой электрической мощности:

$$\eta_{System} = \frac{P_R}{P_{el}} = \frac{P_R}{U_{Stack} \cdot I_{Stack}}$$

- η_{System}= коэффициент полезного действия системы
- P_R= полезная мощность
- P_{el}= электрическая мощность пакета (соответствует мощности, вводимой в систему автономного электроснабжения и систему регулирования напряжения)
- U_{Stack} = напряжение пакета
- I_{Stack} = сила тока пакета