

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки)

Энергетические комплексы и системы управления

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Водородная система автономного энергообеспечения  
малой мощности

Студент

Д.Р. Алтунбаев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« » 2018 г.

**Допустить к защите**

Зав. кафедрой «ЭМиСУ»

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная  
подпись)

« » 2018 г.

Тольятти 2018

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АЭС – автономная электроэнергетическая система;

ЛЭП – линии электропередач;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ТЭС – теплоэлектростанция;

ДГУ – дизель-генераторная установка;

АКБ – аккумуляторная батарея;

ИБП – источники бесперебойного питания;

БГУ – бензиновая генераторная установка;

ВСЭ – ветро-солнечная электростанция;

ВСЭС – водородная система энергоснабжения;

ТЭ – топливный элемент;

МПВЭ – международное партнерство по водородной экономике;

СРЭ – системы резервного энергоснабжения;

ПОМ – протоно-обменная мембрана;

ВСУ – водородная силовая установка;

РЭ – резервное энергообеспечение;

ИБП – источник бесперебойного питания;

ДН – датчик напряжения.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Аналитический обзор информационных источников по теме работы.....	8
1.1 Виды накопителей энергии.....	11
2 Перспективы использования водорода в энергетике.....	21
2.1 Получение водорода.....	21
2.2 Накопители водорода.....	22
2.3 Металлогидридный накопитель водорода.....	24
2.4 Топливные элементы.....	25
2.4.1 Энергоэффективность топливного элемента.....	29
2.4.2 Восстановители для топливных элементов.....	33
2.4.3 Системы резервного энергоснабжения.....	36
2.5 Водородная система энергообеспечения.....	37
2.6 Экспериментальное исследование получения водорода с использованием солнечной энергии.....	40
2.7 Разработка систем хранения водорода на основе сложных гидридов металла.....	45
2.7.1 Термолиз.....	46
2.7.2 Исследование и моделирование различных емкостных систем термолиза.....	47
2.7.3 Натриевые системы на основе ацетата натрия.....	50
2.7.4 Гидролиз.....	52
2.7.5 Разработка резервуара для гидролиза на основе реактора.....	52
3 Сравнение классических систем энергообеспечения и водородной системы автономного энергообеспечения малой мощности до 5 квт.....	53
3.1 Структура существующих систем резервного энергообеспечения на базе аккумулятора и дизельного генератора.....	54
3.1.1 Недостатки существующих СРЭ.....	54

3.1.2 Проблемы ДГУ в составе СРЭ.....	56
3.2 СРЭ на базе водородной системы автономного энергообеспечения..	56
3.2.1 Преимущества водородной системы.....	57
3.3 Оценочный анализ классических систем и водородной системы.....	57
3.3.1 Дизельный генератор с буферным АКБ.....	59
3.3.2 Бензиновый генератор на газовом топливе с буферным АКБ	67
3.3.3 Ветро-солнечная электростанция с АКБ.....	70
3.3.4 Автономная гибридная установка энергообеспечения на базе водородной электростанции.....	74
Заключение.....	85
Список используемых источников.....	87

## ВВЕДЕНИЕ

В целях повышения эффективности традиционных источников электроэнергии (рисунок 1), такие как солнечные и ветровые электростанции, а также обеспечение надежного электроснабжения резерва для потребителей, снижение экологической нагрузки на природу, требует весьма эффективных средств накопления и производства энергии.

«Увеличение пропускной способности систем от электрохимических батарей связано с высокими затратами, они становятся ненадежными после длительной эксплуатации, чувствительны к температуре и являются опасными для окружающей среды при утилизации» [24].

Так же для небольшой системы выработки энергии габаритные характеристики устройств хранения энергии становятся критическими. Технология металлгидридного накопителя является хорошей альтернативой другим системам хранения. «Время резервирования энергии при использовании технологии металлгидридного накопителя на основе водородных топливных элементов зависит только от количества хранимого водорода. У водородной системы не существует проблемы подзарядки и саморазряда, что гарантирует стабильность энергетических параметров, упрощает работу источника питания»[24].



Рисунок 1– Традиционные источники электроэнергии[23]

Таким образом, возникает необходимость в развитии малой энергетики, а именно, на базе водородной системы энергоснабжения. При этом внедрение малой энергетики целесообразно как в жилых зданиях, так и для резервного электропитания медицинских учреждений, банковских систем, непрерывных производств, телекоммуникационных узлов, систем управления транспортом и городским хозяйством и т.п., что обеспечит рационально экологическое и ответственное использование топливно–энергетических ресурсов.

Целью диссертационной работы является анализ возможных вариантов автономных систем электроснабжения.

В процессе исследования выполнены следующие задачи:

- Проведен анализ автономных систем электроснабжения.
- Оценен рынок ДГУ, БГУ, ВСЭ, ВСЭС.
- Разработана система электроснабжения удаленного населенного пункта на базе водородной системы.

Объект исследования: энергетические установки резервного электропитания

Предмет исследования: автономная гибридная установка энергообеспечения на базе водородной электростанции мощностью 5кВт.

Научная новизна работы:

- установлено необходимое число элементов энергосистемы для устойчивого и бесперебойного энергоснабжения потребителя;
- установлено, что разработанная автономная система энергоснабжения на базе водородной системы экономически целесообразна при отсутствии возможности подключения к централизованной системе энергоснабжения со сроком службы более 20 лет.

Практическая значимость работы:

- результат работы позволяет установить перспективы развития темы применения малой энергетики, на базе водородной системы энергоснабжения.

Апробация работы:

Основные положения работы были представлены в виде доклада на студенческих научно-технических конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключений. Объем диссертации составляет 91 страниц, включая 36 рисунка, 27 таблиц.

В ходе исследования был проведен сравнительный анализ классических систем энергообеспечения и водородной системы малой мощности до 5 кВт. Была предложена система на базе автономной водородной системы энергоснабжения.

## 1 Аналитический обзор информационных источников по теме работы

«Современное состояние мировой энергетики, основанной, главным образом, на традиционных углеводородных источниках сырья, даже по оптимистичным оценкам характеризуется как предкризисное. И дело не только в очевидном истощении этих ресурсов, но и в возрастании опасности глобальных катастроф вследствие загрязнения окружающей среды. Безусловно, атомная энергетика с учетом имеющихся запасов урана в тории будет играть все большую роль в мировой экономике. Предполагается, что в отдаленном будущем решающее место в крупномасштабной энергетике займет термоядерная энергия. Однако уже сейчас видно, что серьезные энергетические и экологические проблемы настигнут мир прежде, чем в строй вступит первая термоядерная электростанция. Кроме того, даже если предположить, что атомная и термоядерная энергетика будет в состоянии произвести необходимое количество электроэнергии, остается неясным, каким образом полученная энергия может обеспечить, например, функционирование транспорта или жизнедеятельность удаленных районов. (На сегодняшний день транспорт использует около половины мирового объема потребления нефтепродуктов, а в США – до 65%)» [24]. При этом в выхлопах двигателей внутреннего сгорания содержится около 45 токсичных веществ, в том числе канцерогены. «Поэтому поиск альтернативных возобновляемых и экологически чистых источников, способных обеспечить человечество энергией на ближайшие сотни лет, является одним из несомненных приоритетов современной науки. Этот поиск показывает, что одним из наиболее вероятных заменителей органического топлива энергоносителей для транспорта и энергетики в целом является водород» [23].



«Водород пригоден для всех видов тепловых двигателей: поршневых, турбинных, поршне-турбинных, двигателей Стирлинга и т.д. При этом водород как топливо имеет высокое содержание энергии на единицу массы – 120,7 МДж/кг, что выше, чем у любого органического топлива» [23]. «Использование водорода для получения энергии ведет к резкому снижению загрязнения окружающей среды» [24].

«При сгорании водорода в кислороде токсичные выхлопы полностью отсутствуют, так как продуктом реакции является вода, а при сгорании в воздухе загрязнения намного ниже, чем при использовании бензина»[24].

«Очень важно, что водород может быть использован для прямого преобразования химической энергии в электрическую. Такое преобразование происходит в электрохимическом генераторе (топливном элементе) при соединении водорода с кислородом на одном из электродов, вредные выбросы при этом практически отсутствуют» [17]. «Коэффициент полезного действия (КПД) топливного элемента может достигать очень высоких значений – от 40 до 70 %, и он относительно мало зависит от установленной мощности и нагрузки»[24], (напомним, что КПД тепловых машин, таких как двигатель внутреннего сгорания, дизель и т.д. не превышает 40%).

«Именно прогресс в разработке топливных элементов (ТЭ) с высоким КПД вселяет уверенность в перспективах использования водорода как топлива при создании автономных мобильных и стационарных источников энергии. Такие источники могут найти широкое применение на транспорте, в том числе в автомобилях с так называемыми "гибридными" двигателями (обычный двигатель плюс электродвигатель на ТЭ)» [24].

«Автомобили с ТЭ особенно перспективны для использования в городских условиях. Другой бурно развивающийся рынок ТЭ связан с необходимостью увеличения длительности непрерывной работы малогабаритных электронных устройств (сотовых телефонов, портативных персональных компьютеров и т.д.) и замены в них обычных батарей и аккумуляторов на более энергоёмкие источники электропитания» [24].

Успехи, достигнутые в разработке ТЭ, рост цен на традиционные энергоносители (в особенности на нефть), политическая нестабильность в странах – экспортерах нефти, экологические проблемы – все это привело к осознанию на правительственном уровне необходимости ускоренного развития исследований и технологий в области водородной энергетики. В этой связи характерно решение президента США Дж. Буша о включении водородной энергетики в число национальных приоритетов. Конгресс США принял решение о финансировании в размере 1,3 млрд. дол. США работ по топливным элементам для автомобилей [1]. Япония поддерживает развитие технологий, основанных на водороде и ТЭ, путем 28-летней программы (1993-2020) с общим бюджетом 2,4 млрд. евро. Финансирование исследований по ТЭ в Европе составляет примерно 1/3 часть от финансирования в США и 1/4 часть от финансирования в Японии [24].

При этом в последние годы страны ЕС активно разрабатывают стратегию консолидации усилий правительств и крупных меж национальных компаний в области разработки водородных технологий и топливных элементов [23].

Отметим, что крупные негосударственные компании, главным образом автомобильные, также вкладывают в разработку водородных технологий значительные средства [1,3,6]. В России, например, компания "Норильский никель" заключила соглашение с Российской академией наук о выделении последней ежегодно 30 млн. долларов на работы в области водородной энергетики [24].

Существуют идеи и более широкой "глобализации" работ по водородной энергетике. «Так, в ноябре 2003 г. подписано соглашение "Международное партнерство по водородной экономике". Его участниками стали Австралия, Великобритания, Бразилия, Германия, ЕС, Индия, Исландия, Италия, Канада, Китай, Норвегия, Республика Корея, Россия, США, Франция, Япония. Предполагается, что "Международное партнерство по водородной экономике" обеспечит механизм организации, оценки и

координации многосторонних исследований, разработок и программ развертывания, которые ускорят переход к глобальной водородной экономике. Очевидно, что для перехода к водородной энергетике необходимо решить серьезные научные, технологические и технические проблемы. К таким проблемам относят в первую очередь получение достаточно дешевого водорода в массовом количестве, хранение и доставку водорода, эффективное его использование» [24].

### 1.1 Виды накопителей энергии

В качестве систем аккумулирования и последующей выработки энергии рассматриваются различные типы накопителей, такие как: механически-потенциальные, накопители водорода, электрохимические аккумуляторы, суперконденсаторы и др.

Одна из элементарных систем хранения большого числа энергии является гидроаккумуляторы (рисунок 2). Работа их основана на вращении лопастей турбины потоком воды, стекающего верхнего в нижнюю емкость: часть потенциальной энергии потока воды переходит в кинетическую, а далее в электрическую энергию. Производительность такие систем обусловлены количеством воды и перепадом высот.



Рисунок 2–Гидроаккумуляторы [24]

«При излишках электроэнергии вода нагнетается в верхнюю емкость при помощи насоса. Тем не менее, у таких системах есть ряд недостатков: распространение гидроаккумуляторов ограничено климатическими условиями, рельефом местности, проблемой затопления больших территорий. Но некоторые из этих недостатков возможно устранить, применяя поршневой способ, когда цилиндр-поршень вырезается в массиве породы и под него закачивается вода под давлением. Когда поршень поднимается вверх гидродавлением энергия запасается, а когда опускается, вода выталкиваемая поршнем вращает лопасти турбин. Объем запасаемой энергии зависит от массы и высоты подъема поршня. Подразумевается, что эффективность может вырасти до 86%» [24].

«Иногда используют сжатый воздух для аккумуляции энергии. Это происходит таким образом, при излишках электроэнергии компрессоры набирают воздух под давлением в бак, а когда не хватает электроэнергии сжатый воздух, вращая газовую турбину, вырабатывает электроэнергию. Так как воздух выдаваемый на газовую турбину охлаждается из-за расширения, то в таком случае его нужно подогревать за счет сжигания природного газа» [24].

«Также существуют накопители тепловой энергии, которые дополняют эти системы. Они нужны для того, что бы выделяющееся тепло при сжатии воздуха в компрессоре скапливалась в теплообменниках, а так же для подогрева выходящего воздуха перед турбиной»[24].

«Работа термодинамических аккумуляторов (рисунок 3) основана на применении теплового цикла рабочего вещества, где происходит переход газа в жидкость и обратно. У таких систем существуют свои преимущества, так и свои недостатки. Первое преимущество — это возможность глубокого разряда. Второе – высокая энергоемкость, ну и третье – независимость от рельефа местности и внешних природных условий» [24].

К недостаткам можно отнести неспособность длительного хранения энергии сжиженного газа из-за его теплообмена с окружающей средой.

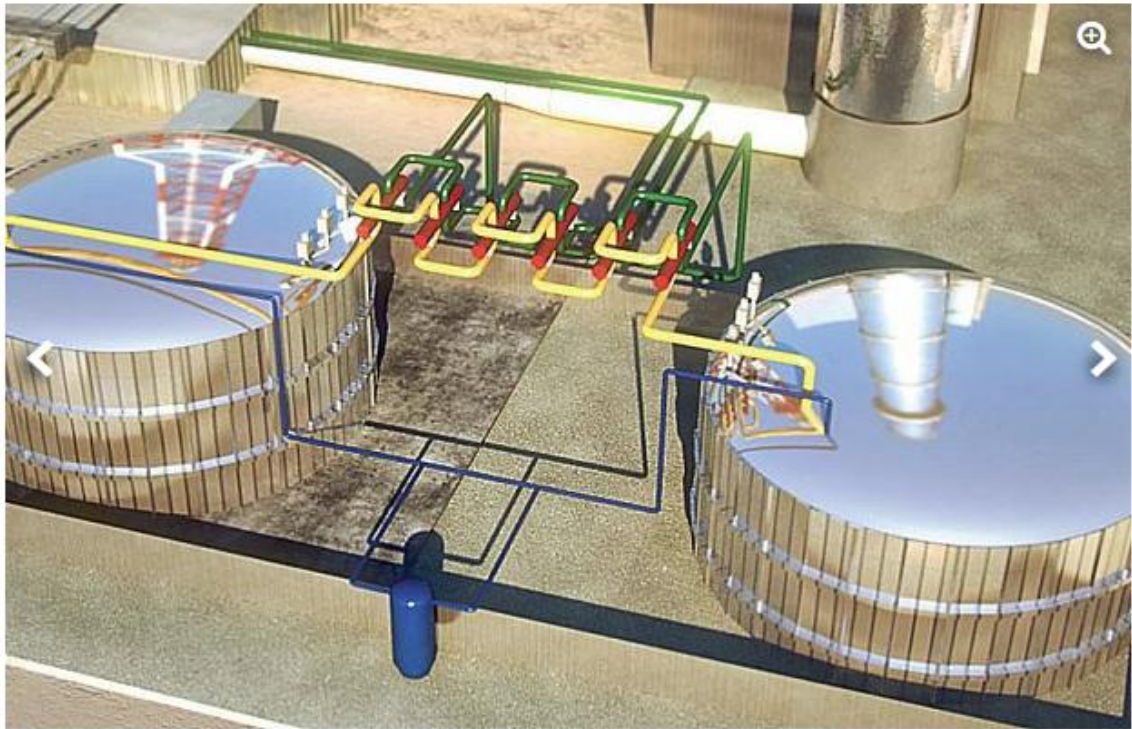


Рисунок 3–Термодинамический аккумулятор[24]

Еще одна из систем аккумулирования — это кинетический накопитель (рисунок 4). Его работа основана на преобразовании кинетической энергии в электрическую и обратно. При заряде происходит раскрутка маховика до высокой скорости, а при разряде маховик вращает только генератора и переводит кинетическую энергию в электрическую.

«Плюсом такой системы является то, что он способен моментально развить высочайшую производительность, но зато требуют больших капитальных вложений, так как маховик очень дорогой. Такой маховик обладает высочайшими прочностными данными, а также уменьшен уровень потерь на трение и на сопротивление воздуха. Еще одним достоинством является длительность аккумулирования энергии, но к сожалению, это приводит еще большим денежным затратам из-за применения сверхпроводников и необходимости обеспечения их рабочего режима» [25].



Рисунок 4–Кинетический накопитель[7]

Одни из наиболее доступных и дешевых видов аккумуляторов это свинцово-кислотные (рисунок 5). Главным минусом является невысокая удельная энергоёмкость, недолговечный, восприимчивый к температуре, наличие эффекта памяти.

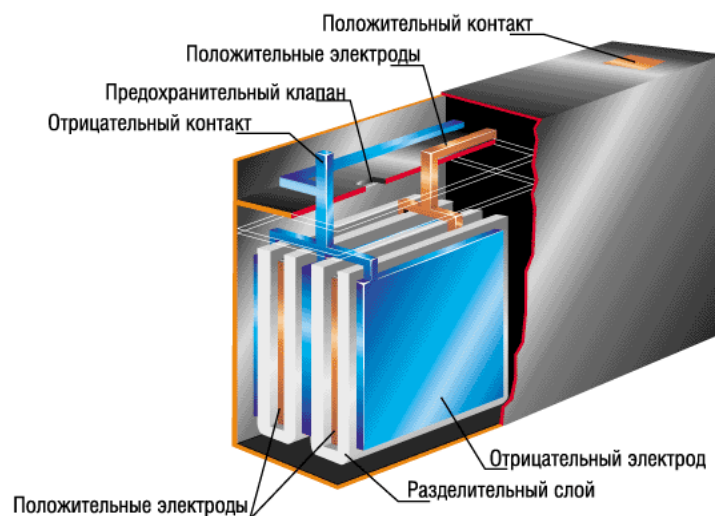


Рисунок 5–Свинцово-кислотный аккумулятор[1]



Но есть и измененные типы таких аккумуляторов с полимерным или гелиевым электролитом. Они уже более долговечнее и не требуют обслуживания. Сейчас подобные аккумуляторы остаются популярными в области аккумулирования электроэнергии в небольших энергетических установках, так же с применением возобновляемых источников энергии.

Другой тип аккумулятора это никель-кадмиевый (рисунок 6). Одним из достоинств такого типа аккумулятора является его срок службы, который может достигать до 21-27 лет. Так же он может работать при пониженных температурах.



Рисунок 6–Никель-кадмиевый аккумулятор[24]

Но есть и минусы – присутствие «эффекта памяти», следовательно, необходим полный разряд батареи и далее нужно сохранить характеристики.

«Так же существует никель-металлогидридный аккумулятор. Из положительных сторон такого аккумулятора это высокие токи заряда и разряда, емкость, стабильное напряжение. Еще одним плюсом является возможность длительных работ с невысоким энергопотреблением,

способность к токоотдаче, небольшое сопротивление. К минусам такого типа можно отнести, то что у него небольшой ресурс и высокий саморазряд» [24].

Следующий тип – натрий-серный аккумулятор. Данный аккумулятор работает в интервале 291–359°C. Из лучших сторон этого аккумулятора, то что он обладает большой удельной энергией и мощностью, неплохой обратимостью и огромным ресурсом. Так же привлекает своей относительной дешевизной и доступностью натрия и серы. Минусы – теряется некоторая часть энергии и высокая рабочая температура.

В последние годы стремительно развивается и распространяется литий-ионные аккумуляторы (рисунок 7). Данный тип используется во многих отраслях на автомобилях с электродвигателем, в переносных источниках питания, космической и авиационной технике. Литий-ионным аккумуляторам свойственна большая энергоемкость, глубокие циклы заряда-разряда, маленький «эффект памяти». Но к сожалению такому типу свойственна– высокая цена.



Рисунок 7–Литий-ионный аккумулятор [10]



Другой тип аккумуляторов — это редокс-аккумуляторы. «Данный накопитель состоит из резервуара химических соединений с различными степенями окисления, насосы для прокачки электролита и электрохимических ячеек. Работа базируется на взаимодействии окисления реагента и перехода электрона с помощью внешней цепи это касательно одном из электродов. У другого же электрода перенесенная через ионообменную мембрану протон возобновляет реагент» [26].

У этих накопителей производительность обуславливается числом электрохимических ячеек, энергоёмкость числом раствора. «Перезарядка выполняется из-за запуска процесса в противоположную сторону посредством подачи внешнего напряжения, а можно просто поменять раствор. Плюсом такого рода системы определяется большая ресурсная характеристика, надёжность к высоким токам заряда-разряда, возможность разряда до 100% и уменьшение удельной цены при масштабировании. Важнейшим минусом этой системы является недостаточность концентрации солей ванадия в серной кислоте, что снижает их энергоёмкость, и к тому же большая цена аккумулятора» [

«Маховиковые накопители (рисунок 8) запасают кинетическую энергию при разгоне ротора, чтобы отдать ее в нужный момент в виде электроэнергии. В качестве разгонного двигателя и средства отбора электроэнергии используется обычно вертикальный двигатель-генератор. Цикл накопления энергии — минуты» [15].

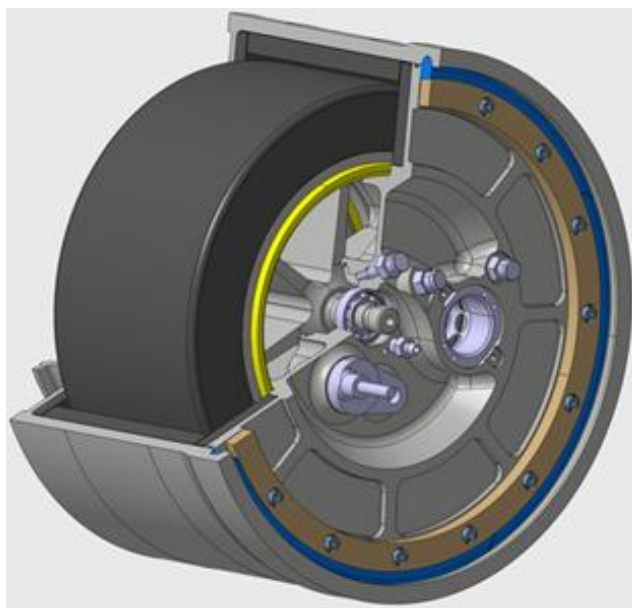


Рисунок 8 – Маховиковые накопители [8]

«Высокоскоростные маховики изготавливаются из совершенных композитных материалов с низкой массой и большой прочностью к центробежным силам. Они более компактны по сравнению с низкоскоростными, маховик которых выполняется из металла» [13].

«Недостатком кинетических накопителей является большая потребность в уходе, чем у аккумуляторов» [13].

«Следующий тип накопителей это суперконденсаторы (рисунок 9). Если сопоставлять с аккумуляторами, то можно увидеть ряд преимуществ. Во-первых, высокая удельная производительность, приличный ресурс и большая глубина разряда. Данный суперконденсатор имеет два пористых электрон-проводящих электродов, поделенным электролитом сепаратором. С целью получения наибольшей емкости следует обеспечить как можно бóльшую поверхность контакта электролита с электронным проводником, следовательно, в проводнике используются нанопористые углеродные материалы. Для того что бы избежать короткого замыкания жидкий электролит заключают в пористый полимерный или асбестовый сепаратор» [24].

«Главный недостаток суперконденсатора заключается в его стоимости, в невысокой удельной емкости и утрата его со временем, сильной зависимостью ёмкости от температуры и сложностью наращивания ёмкости и производительности» [20].



Рисунок 9 – Суперконденсатор [9]

И наконец последним видом накопителей энергии – накопитель водорода, информация по которому представлена в следующей главе.

Выводы:

Таким образом поиск альтернативных возобновляемых и экологически чистых источников, способных обеспечить человечество энергией на ближайшие сотни лет, является одним из несомненных приоритетов современной науки. Этот поиск показывает, что одним из наиболее вероятных заменителей органического топлива энергоносителей для транспорта и энергетики в целом является водород.

## 2 Перспективы использования водорода в энергетике

### 2.1 Получение водорода

В последние годы становится все более очевидным, что акцент на более чистое топливо приведет к существенному использованию водорода. Водород - это химический элемент с символом H и атомным номером 1. При атомном весе 1,00794 водород является самым легким элементом в периодической таблице. Его одноатомная форма (H) является самым распространенным химическим веществом во Вселенной, в отличие от кислорода, водород не найден как свободный в природе при любой значительной концентрации, составляющей примерно 75% всей барионной массы. Водород является первым элементом таблицы Менделеева, что делает его самым легким элементом на Земле. Поскольку газообразный водород настолько лёгкий, он поднимается в атмосфере и поэтому редко встречается в чистом виде, H<sub>2</sub>.

Водород производится с использованием как возобновляемыми, так и не возобновляемыми ресурсами с различными технологическими решениями. Имеющиеся технология по получению водорода - это реформирование природного газа, газификация угля и биомассы, расщепление воды электролизом воды, фотоэлектролизом, фотобиологической продукцией, гидротермическим термохимическим циклом и высокотемпературным разложением.

Основные способы получения водорода включают процессы электролиза воды и природного газа. Во всем мире растущий спрос на водород, например, на водородные топливные элементы, сделал решающим для поиска методов получения водорода из недорогих простых процессов, многие исследователи предложили некоторые инновационные пути. Интересно, что большое количество методов включало гидроксид натрия в

качестве основного ингредиента. Использование гидроокиси натрия для производства водорода не ново и было применено даже в XIX веке[24].

## 2.2 Накопители водорода

Водородное топливо представляет собой топливо с нулевым уровнем выбросов, в котором используются электрохимические элементы, сгорая внутри двигателя, тем самым питая транспортное средство и электрические устройства. Он также используется в двигателе космического корабля и может применяться для пассажирских транспортных средств и самолетов.

Энергия водорода благоприятна для окружающей среды. «Из-за экологических проблем актуальность эксплуатации водорода как универсального топлива, а также создания систем резервирования и аккумуляирования энергии является современной и актуальной. Потому, что подобные системы необходимы для увеличения эффективности использования классических и возобновляемых источников электроэнергии, с целью потребления энергии, снижения экологической нагрузки на природу. Кроме того, существует большой спрос на системы дополнительного электропитания для, компьютерной обработки данных, транспортной инфраструктуры, для управления работой и обеспечения безопасности автономных и других объектов электропотребления» [24].

«Накопители водорода (рисунок 10) используют получаемый электролизом воды газ, который запасается в емкостях и затем используется в качестве горючего для топливных элементов или газовых турбин» [24].

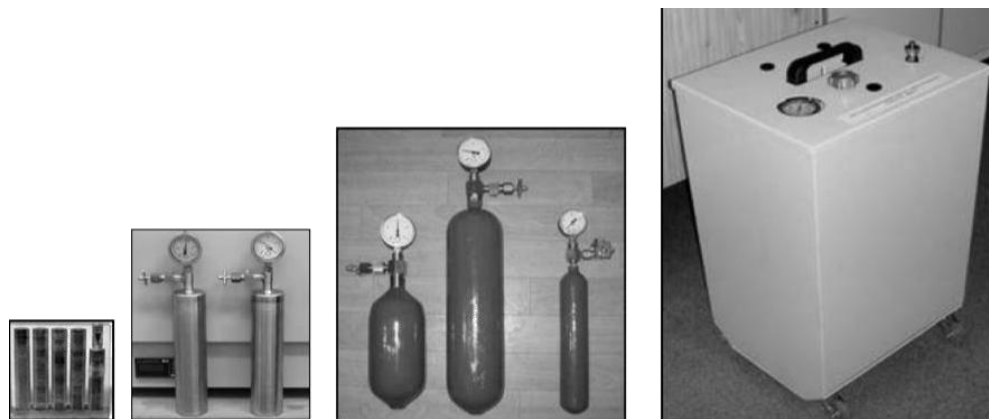


Рисунок10 – Накопители водорода[6]

«Запасание водорода может производиться в баках, подземных хранилищах, в жидком (криогенном) виде, в гидридных пористых материалах. Наиболее распространено в настоящее время запасание водорода в виде сжатого газа. Одна из главных проблем водородного накопления энергии в баллонах это малогабаритность и безопасность системы обратимого хранения водорода в условиях окружающей среды» [24].

Поэтому из числа более перспективных способов хранения энергии выделяется металлгидридный накопитель водорода (рисунок 11).

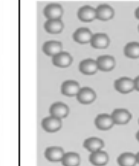
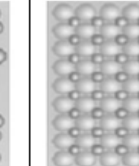


Рисунок 11–Металлогидридный накопитель водорода[4]

## 2.3 Металлогидридный накопитель водорода

«Этот способ хранения основан на обратимой реакции взаимодействия с водородом металлов, интерметаллических соединений, сплавов и композиционных материалов. Преимущество данного способа хранения водорода над другими представлена в таблице 1» [26].

Таблица 1–Различные способы хранения водорода

	Состояние водорода				
	Газообразный водород			Жидкий водород	Водород в гидриде
Давление (атм)	1	350	700	1	1
Температура (К)	300	300	300	20	300
Расстояние H <sub>2</sub> –H <sub>2</sub> или H–H (нм)	3,3	0,54	0,45	0,36	0,21
Концентрация атомов (ат/см <sup>3</sup> )	$5,6 \times 10^{19}$	$1,3 \times 10^{22}$	$2,3 \times 10^{22}$	$4,2 \times 10^{22}$	$10,7 \times 10^{22}$
Схема расположения молекул или атомов водорода					

Интерес к этой системе обусловлено высокой водородоемкостью. В сосуде, заполненном металлогидридом, можно хранить водород в 2-3 раза больше чем, если бы эту же емкость заполнить жидким водородом. Способ хранения водорода в металлогидридах выгодно отличается от газобаллонного и криогенного. «Металлогидридных накопителей водорода обусловлены своей малой габаритностью вследствие большого объемного содержания водорода, безопасностью из-за химически связанного водорода, малого давления гидридообразования, умеренными требованиями по обслуживанию, вследствие своей несложной конструкции и нету утечек водорода из-за низких давлений» [24].

Металлогидридный накопитель водорода могут использовать как для безопасного и компактного хранения водорода, так и для решение некоторых других задач, перечисленных ниже.

1. Очистка водорода – удаление из водорода до единиц ppm примесей.
2. отделение водорода – выделение водорода из смеси, содержащей от 1 до 90% не водородных атомов и молекул.
3. Разделение изотопов – протия, дейтерия и трития.
4. Компримирование водорода – водород сорбируется при низкой температуре, а десорбируется при более высокой температуре, создавая высокое давление.
5. Аккумулирование тепла – процесс основан на использовании теплового эффекта реакции гидрирования/дегидрирования для поглощения или выделения тепла.

Работа металлгидридного накопителя основана на обратимой реакции гидрирования различных металлов, интерметаллических соединений, сплавов и композиционных материалов.

«К достоинству металлгидридного накопителя водорода можно отнести высокое объемное содержание водорода, широкий интервал рабочих давлений и температур, постоянство давления при гидрировании и дегидрировании, регулируемость давления и скорости выделения водорода изменением температуры. Другие плюсы металлгидридных накопителей водорода то, что они несложны по конструкции, довольно надежны и безопасны при эксплуатации, обладают невысокой вероятности утечек водорода из-за своего низкого давления, бесшумны и компактный»[24].

«Подобные системы могут заправляться водородом прямо от электрохимического генератора водорода, а выделяющийся водород непосредственно используется для питания топливных элементов» [15].

## 2.4 Топливные элементы

Топливный элемент (рисунок 12) – это химический источник тока (ХИТ), в котором электрическая энергия образуется в результате химической реакции между восстановителем и окислителем, непрерывно и отдельно



поступающими к электродам ТЭ извне. Продукты реакции непрерывно выводятся из топливного элемента.

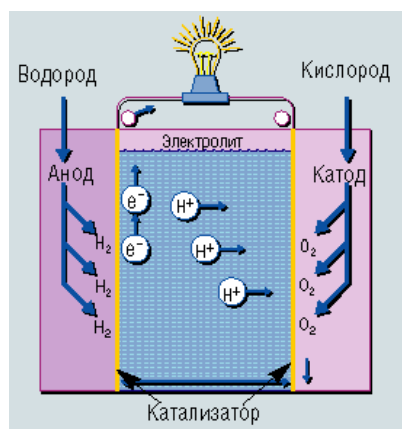
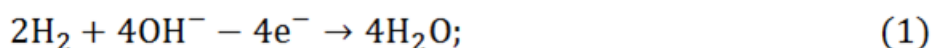


Рисунок 12–Топливный элемент[6]

Химические реакции в топливном элементе применяются на специальных пористых электропроводящих электродах, разделенных ионпроводящим электролитом (концентрированным раствором щелочи). В рассматриваемом примере водород окисляется на аноде, кислород восстанавливается на катоде[25]:



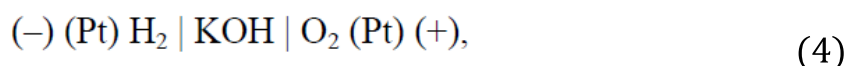
Гидроксид-ионы  $\text{OH}^-$  перемещаются в электролите от катода к аноду, в свою очередь электроны  $\text{e}^-$  во внешней цепи – от анода к катоду. Суммируя уравнения реакций (1) и (2), получим уравнение токообразующей реакции:



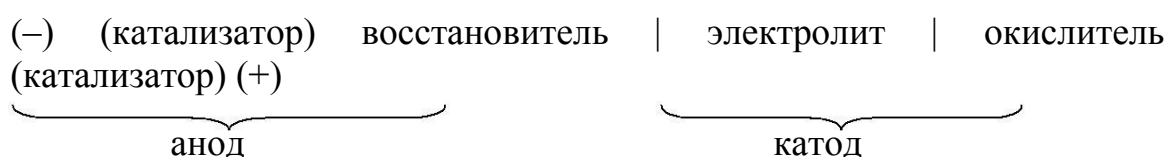
Поэтому, в результате протекания пространственно разделенных

полуреакций (1) и (2) во внешней цепи возникает постоянный электрический ток, то есть происходит прямое преобразование химической энергии реакции (3) в электроэнергию [25].

Электрохимическую систему ячейки ТЭ, в котором протекает брутто-реакция (3), можно записать следующим образом:



или в общем виде:



Напряжение цепи в электрохимической системе равно

$E = E_{\text{к}} - E_{\text{а}}$ , где  $E_{\text{к}}$  и  $E_{\text{а}}$  – электродные потенциалы катода и анода соответственно.

Их значения могут быть рассчитаны по уравнению Нернста. Например, для водородно-кислородного ТЭ с щелочным электролитом:

$$E_{\text{к}} = E_{\text{O}_2/\text{OH}^-}^0 + 2,3 \frac{RT}{4F} \lg \frac{p_{\text{O}_2} a_{\text{H}_2\text{O}}^2}{a_{\text{OH}^-}^4}, \quad (5)$$

$$E_{\text{а}} = 2,3 \frac{RT}{4F} \lg \frac{a_{\text{H}_2\text{O}}^4}{p_{\text{H}_2}^2 a_{\text{OH}^-}^4}, \quad (6)$$

$$E = E_{\text{O}_2/\text{OH}^-}^0 + 2,3 \frac{RT}{4F} \lg \frac{p_{\text{O}_2} p_{\text{H}_2}^2}{a_{\text{H}_2\text{O}}^2}. \quad (7)$$

При единичных парциальных давлениях  $p_i$  и активностях  $a_i$  реагентов напряжение цепи принимает максимальное значение, в данном примере равное стандартному электродному потенциалу кислородного электрода в

щелочной среде (0,401 В) [26].

В топливных элементах применяются не расходующиеся электроды, такие как восстановитель и окислитель. Они поступают во время работы, а не закладываются заблаговременно, как например в гальваническом элементе или аккумуляторе. Из-за этого ТЭ работают длительное время (около 10-ов тыс. часов). Так же ТЭ конвертирует химическую энергию в электронную до тех пор, пока в него поступают реагенты. К тому же, материал из которого состоит проводник оказывает значительное воздействие на свойства вещества, существенно ускоряя парциальные реакции на аноде и катоде.

К примеру, в гальваническом элементе Лекланше (рисунок 13) восстановителем считается металлический цинк, окислителем – оксид марганца (IV), а в качестве электролита выступает водный раствор, имеющий (в основном) хлориды аммония и цинка.

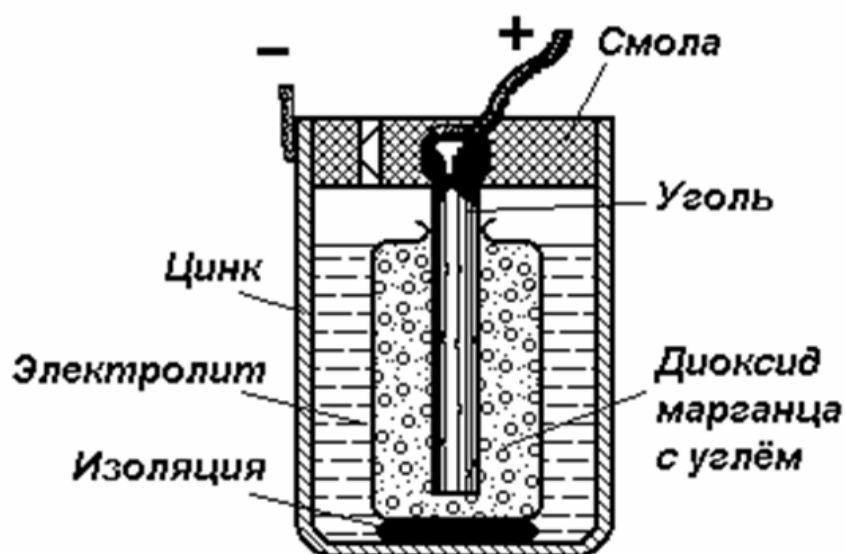
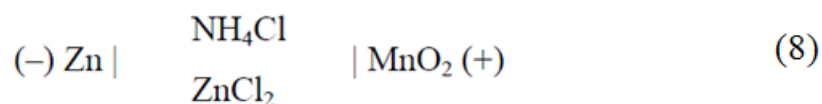


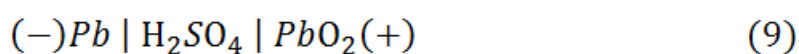
Рисунок 13 – Гальванический элемент Лекланше[8]

Химическую систему ячейки такого солевого вещества записывают так [8]:

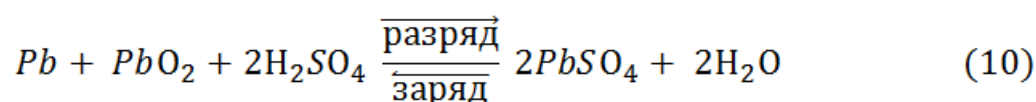


После того как происходит разрядка элемента, активные вещества анода и катода расходуются. Если гальванический элемент полностью разряжен, то к последующей работе непригоден [25].

Восстановить работоспособность аккумуляторов возможно при помощи заряда. При заряде продукты разряда преобразуются в первоначальные реагенты. Так, в свинцовом аккумуляторе



Токообразующая реакция:



При заряде вещества происходит обратный процесс, а аккумулятор не производит, а использует электронную энергию [25].

Дополнительным плюсом ТЭ считается маленький расход используемых материалов по сравнению с классическими химическими системами. В конце концов, при работе ТЭ исключаются малоэффективные, идущие с огромными потерями энергии, процессы горения и не случается образование экологически вредоносных продуктов окисления [25].

#### 2.4.1 Энергоэффективность топливного элемента

В энергоблоках тепловых электростанций энергия сгорания топлива превращается сначала в тепловую энергию, затем в механическую и только потом в электрическую энергию (рисунок 14).

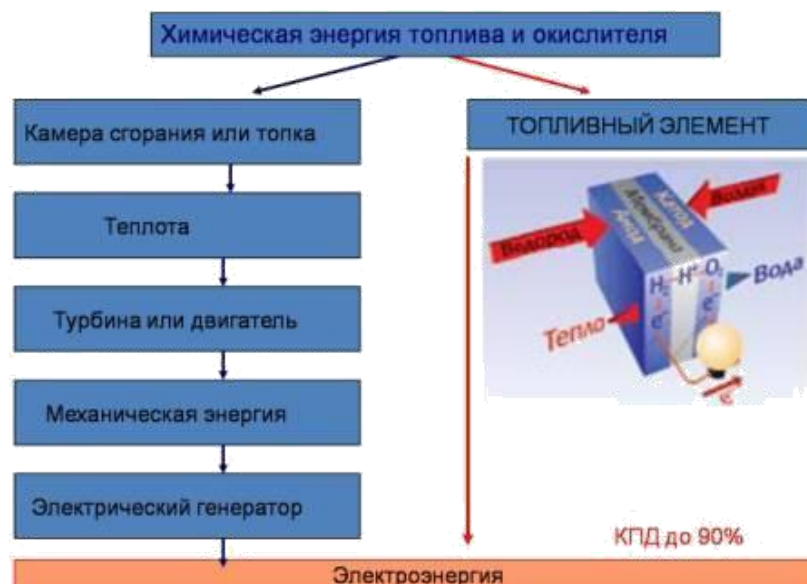


Рисунок 14 – Преобразование химической энергии[25]

КПД такого многоступенчатого преобразования не более 20–45 % [25].

В топливном элементе энергия химической реакции восстановителя («топлива») с окислителем преобразуется в электрическую энергию напрямую, т.е. без образования других видов энергии. При этом можно принципиально достичь высоких значений КПД [26].

Максимальная полезная работа, которая может быть произведена в ХИТ, равна убыли энергии Гиббса ( $-G$ ) в токообразующей реакции. В энергетических расчетах максимальный КПД представляет собой отношение этой работы к убыли энтальпии при сгорании топлива ( $-H$ ) [25]:

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{-\Delta G}{-\Delta H} \quad (11)$$

С учетом уравнения Гиббса-Гельмгольца получим:

$$\eta_{\text{макс}} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H} \quad (12)$$

Энергии электрохимическим путем можно получить как больше, так и меньше, все зависит от знака при  $S$ , чем это соответствует тепловому эффекту реакции окисления топлива. Если учесть, что при горении  $H < 0$ , то при  $S > 0$  значение  $\eta_{\text{макс}} > 1$ . Это говорит о том, что при изотермической и обратимой работе ХИТ в электрическую энергию превращается не только химическая энергия ( $-H$ ), но и поступающее из окружающей среды тепло в количестве  $Q = T S$ , а потому КПД такого источника тока превысит 100 % [25].

Знак изменения энтропии ориентируется балансом превращения газов, участвующих в токообразующей реакции. Например, в реакции (3), протекающей с образованием жидкой воды, количество моль уменьшается с 3 до 0, и  $S < 0$ . Для реакции  $C + 1/2O_{2(g)} = CO_{(g)}$  количество моль газов, напротив, увеличивается с 0,5 до 1, поэтому  $S > 0$  и  $\eta_{\text{макс}} > 1$  [25].

На самом деле КПД топливных элементов не превышает 65%, но зато выделяющиеся тепло при работе ТЭ можно использовать для генерации дополнительной электрической энергии с помощью паровых или газовых турбин.

Основными электрическими характеристиками топливного элемента представлены в таблице 1.

Таблица 1- Основные электрические характеристики ТЭ

– электродвижущая сила $E$ ;
– внутреннее электрическое сопротивление $r$ ;
– электрическая мощность $P$ ;
– электрический коэффициент полезного действия $\eta$ .

ЭДС представляет собой отношение полной работы, совершаемой источником тока при перемещении единичного заряда по замкнутой электрической цепи, к величине этого заряда[25].

Полная электрическая мощность источника равна:

$$P_{\text{макс}} = EI \quad (13)$$

Эта мощность выделяется на сопротивлении нагрузки и на внутреннем сопротивлении элемента следующим образом. Мощность, рассеиваемая на сопротивлении нагрузки будет равна [25]:

$$P_{\text{нагр}} = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (14)$$

Электрическая мощность, рассеиваемая на внутреннем сопротивлении элемента (мощность потерь в цепи) будет равна [25]:

$$P_{\text{потерь}} = (E - U)I = \frac{(E - U)^2}{r} = I^2 r \quad (15)$$

В вышеописанной интерпретации мощностей электрической КПД системы, очевидно, будет равен [25]:

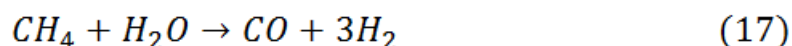
$$\eta = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{U}{E} = \frac{R}{R + r} \quad (16)$$

Отношение  $U/E$  обычно называется КПД по напряжению.

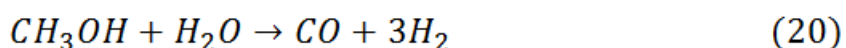
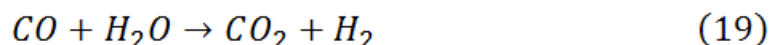
#### 2.4.2 Восстановители для топливных элементов

Для того что бы выбрать восстановитель для ТЭ, нужно учесть ряд факторов. Такие как: экологические нормы, стоимость, химическая активность, доступность, а самое главное возможностью простого подвода и отвода реагентов в топливный элемент. Нынешняя разработка топливных элементов обусловлена в основном использованием газообразных и жидких топлив. При этом с приемлемой (достаточно высокой) скоростью в ТЭ может окисляться только водород, в специальных видах ТЭ – оксид углерода (II) и метанол[25].

В природе водород встречается только в различных соединениях, одна из которые является вода. Можно было бы получать водород посредством электролиза воды, но данный метод очень энергоемкий. Поэтому в больших объемах производства водорода применяется более дешевый метод переработки природного газа, основным компонентом которого является метан  $CH_4$ . При его реакции с горячими водяными парами образуется синтез-газ:



Более того, в водород и другие газы заранее конвертируются иные природные виды топлива, а также метанол, например, по реакциям:



Вещества, полученные методом конверсии, подаются в ТЭ, но после того как будет проведена очистка и разделение. Применяя данную технологию стоимость водорода составит в 4–5 раз выше, чем у бензина. Так



же, получение водорода с помощью данных технологий снижает экологические нормы из-за образования угарного газа. И поэтому нельзя будет утверждать, что водород это чистое топливо[25].

Далее в таблице 2 приведены классификации топливных элементов в соответствии с диапазоном рабочих температур.

Таблица 2 – классификации топливных элементов в соответствии с рабочей температурой

Низкотемпературные топливные элементы	Высокотемпературные топливные элементы	Среднетемпературные топливные элементы
– твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ),	– расплавкарбонатные (РКТЭ)	– фосфорнокислые (ФКТЭ)
– щелочные топливные элементы (ЩТЭ)	– твердооксидные (ТОТЭ)	

Токообразующие элементы в ТЭ не закладываются предварительно при производстве электродов, а подводятся по мере израсходования, это и является одним из главных отличии топливных элементов от аккумуляторов [25].

Методика топливного элемента дает возможность осуществлять системы электропитания разного масштаба - мощностью с 1-го Ватта вплоть до Мегаватт [25].

«Сфера ТЭ включает в себя важные области инфраструктуры, такие как: хранения и распределения топлива для ТЭ. Формирования данного раздела отражено в этом документе. Запланированные возможности развития

отрасли на ближайшие годы (3 – 5 лет) для основных секторов применения ТЭ»[24].

«В отличие от ДВС или аккумулятора, топливные элементы удачно внедряются на целом ряде рынков, где признаются несомненные преимущества ТЭ. Поставки ТЭ продолжают увеличиваться, показывая ежегодное удвоение количества поставляемых систем. Продолжается рост объема заказов на системы ТЭ во всех секторах. Большинство специалистов дают оценки роста ежегодного числа заказов на 40–55%» [24].

Так же продолжает лидировать в отрасли ТЭ стационарный сектор, из-за большой единичной мощности каждой единицы оборудования. На ближайшие годы ожидается устойчивый рост на 40% в год.

«Общая азиатская область тоже преобладает во внедрении технологии ТЭ в течение последних 5 лет. Ожидаются поставки в этот регион на уровне 60%. По мощности поставляемых систем доминирование не так велико благодаря растущему рынку больших стационарных систем в Северной Америке» [24].

Самым распространенным типом по количеству поставляемых оборудования в мире ТЭ является протонно-обменная. Это обусловлено тем, что данный тип ТЭ одинаково пригодна для систем малого и большого масштаба.

Возросли применения ТЭ и в области автомобилестроения. Так как были заключены партнерские соглашения высокого уровня. Тем самым поднимая интерес к технологии ТЭ и в развитии водородной энергетики в целом[25].

Промышленность ТЭ продолжает усиливаться, продвигаясь от научно-технических проектов к полномасштабной коммерческой области.

«Так же одним из значительных воздействий на рост в сегменте ТЭ оказывает еще одно направление – сектор СРЭ (систем резервного и автономного энергоснабжения на ТЭ). Данные системы широко используются практически во всех областях, где обеспечение непрерывного

электроснабжения является обязательным условием нормального функционирования»[22]. «Это системы связи, и в особенности, оборудование операторов мобильной связи. К этому классу относятся также «оборудование и системы для критических приложений»: медицинские системы жизнеобеспечения, дата-центры (ЦОД), системы правительственной и ведомственной связи, системы управления наземным и воздушным транспортом и т.п.»[24].

«Очевидные преимущества реализации систем СРЭ на топливных элементах по сравнению с классическими системами на аккумуляторах и дизель-генераторах привлекают все больше внимание к системам резервного питания на ТЭ. Операторы связи во всем мире проводят практическую работу по переходу систем резервирования питания в своих сетях на топливные элементы» [26].

#### 2.4.3 Системы резервного энергоснабжения

«Использование топливных элементов как резервных систем электропитания на рынке телекоммуникаций получило распространение благодаря Recovery Act от 2009 года Правительства США» [13]. «Ballard Power Systems Ballard сообщает, что заказы на ее систему ElectraGen™ из Азии и Африки остаются на стабильно высоком уровне — по 100–200 единиц в месяц. Сейчас Ballard предлагает оба типа ТЭ для систем резервного питания (на водороде и на метаноле) после приобретения части бизнеса у IdaTech. Системы на метаноле показали особую популярность и за девять месяцев с момента приобретения этой технологии Ballard поставила более 500 таких систем» [24].

«Ураган Сэнди прошел по восточному побережью США в октябре 2012 года с большим разрушительным эффектом, но в течение этого времени башни сотовой связи, получающие питание от систем на ТЭ» [5]. «Сохраняли работоспособность и на длительный период обеспечили связью абонентов в

Нью-Йорке, Нью-Джерси и Коннектикуте» [6]. «Alteryx имеет более 60 систем на ТЭ, установленных в зоне катастрофы, и они нормально работали во время шторма и непосредственно после шторма» [5].

«Азия, и в частности Китай, представляет собой огромный рынок для ТЭ технологий в связи с экспоненциальным ростом мобильных телефонов. Здесь представлен целый ряд компаний, включая VN Technologies, ReliOn, FutureE и Ballard, которые вовлечены в реализацию пилотных проектов для основных провайдеров телекоммуникационных услуг» [6]. «Пилотные проекты в США, в конце концов, приводят к многочисленным заказам оборудования, и есть надежда, что-то же самое произойдет и в Китае, родине двух из трех крупнейших мобильных операторов в мире: China Mobile и China Telecom. Оба испытывают у себя системы на ТЭ» [7].

## 2.5 Водородная система энергообеспечения

Водородная система энергообеспечения (рисунок 15) включает в себя возобновляемые источники энергии, например солнечную батарею, которая будет служить только для запуска электролизера. Генератор водорода, то есть электролизер генерирует водород. «Далее водород поступает в емкость для хранения водорода, в нашем случае металлогидридный накопитель водорода. Следующим элементом данной системы является топливный элемент, преобразующие химическую энергию окисления водорода в электрическую. Топливные элементы производят электрическую энергию до тех пор, пока на анод подается водород, а на катод – воздух. Энергоемкость такой системы обеспечивается объемом запасённого водорода, а мощность – количеством топливных элементов в батарее» [24].

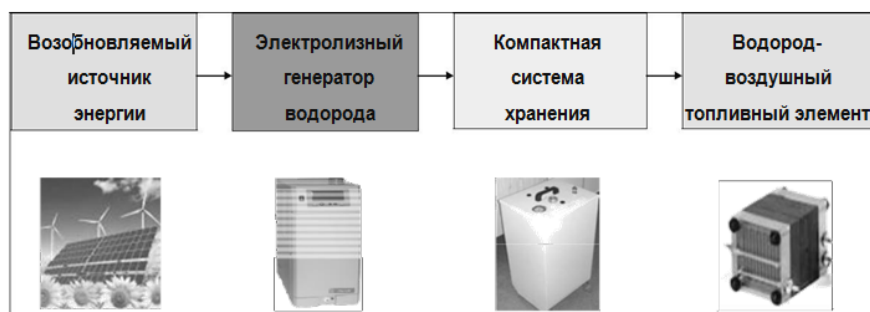


Рисунок 15 – Технология водородного накопления энергии[5]

Далее в таблице 3 представлены преимущества водородных систем.

Таблица 3 – Преимущества водородных систем

- возможность повышения мощности и энергоемкости путем увеличения количества стандартных модулей;
- высокий КПД (более 50%);
- длительность хранения запасов энергии;
- высокая энергоемкость (более 150 Вт*ч/кг);
- независимость энергоемкости от температуры;
- простота регламентного обслуживания.

Так же к достоинствам такой системы можно отнести, то что не приносит вреда окружающей среде, издает мало шума.

Исследования разных технологий накопления энергии показывает, что водородные системы обладают значительными преимуществами, которая представлена в таблице 4.

Таблица4 – Сравнение электрохимических и водородных систем резервирования и аккумулярования энергии

Показатель	Электрохимические батареи	Дизельный генератор	Водородная система
Эффективность (КПД)	70%	<35%	55%
Средний срок службы	4 года	7 лет	15 лет
Обслуживание	периодическое: замена батарей каждые 5–7 лет	периодическое: замена масла, фильтров, топлива	замена воздушного фильтра каждые 2 года
Климат	необходимо кондиционирование летом, обогрев зимой	система не требует поддержания микроклимата	система не требует поддержания микроклимата
Шумность	отсутствует	высокая	отсутствует
Выхлоп	отсутствует	продукты сгорания топлива	отсутствует
Цикл работы	химическая энергия → электроэнергия	химическая энергия → механическая энергия → электроэнергия	химическая энергия → электроэнергия
Возможность длительной работы	нет	да	да
Время запуска	быстро	0,5–2 минуты	быстро

«Поэтому можно сделать вывод, что использование водородного накопления электроэнергии более выигрышно в системах, для которых свойственна большая энергоёмкость при небольшой мощности и

ограничения по объему аккумулирования. В системах с различными требованиями к накоплению энергии могут быть применены гибридные накопители электрической энергии, включающие в себя комбинации различных технологий, объединенные единой системой преобразования и управления (рисунок 16)»[24].



Рисунок 16 – Гибридная система аккумулирования энергии[7]

## 2.6 Экспериментальное исследование получения водорода с использованием солнечной энергии

Водород является устойчивым вариантом топлива и одним из возможных решений экологических проблем. В этом исследовании водород получают с помощью генератора водорода с протоно-обменной мембраной (ПОМ) электролизера. Экспериментальное исследование проводится в центре развития возобновляемых источников энергии в Алжире.

Экспериментальное устройство содержит: фотоэлектрический модуль, электролизер ПОМ, газометр и устройства для измерения характеристики электролизера ПОМ, а также два пиранометра и диффузор. Эта система позволила с одной стороны измерить и проанализировать характеристику

электролизера ПОМ при разных давлениях ( $p_{atm}$  и  $p = 3$  бар), а с другой стороны, позволила изучить объем водорода в различных источниках электроэнергии (генератор, фотоэлектрический модуль, лампа дневного света). КПД для каждого случая вычислялась и сравнивалась. В данной статье представлены значения изменения скорости потока водорода, в зависимости от времени суток, эксперимент проводился в августе в дневное время суток.

Водород рассматривается как энергоноситель будущего. Он может быть получен различными способами, в том числе с использованием солнечной энергии, а так же при помощи солнечной тепловой энергии.

Солнечная энергия может быть использовано в электролизере, чтобы разложить дистиллированную воду на водород и кислород. Автономные системы электролизера служат для производства водородного топлива. Это система состоит из фотоэлектрического модуля, который поставляет электричество через систему электролизера, как показано в крупных проектах в Калифорнии, Германии и Саудовской Аравии.

Электролиз воды считается одним из ключевых технологий для получения водорода, так как она совместима с существующими и будущими технологиями выработки электроэнергии и большого количества возобновляемых технологий (солнечная энергия, биомасса, гидроэнергия, ветер, приливы и отливы, и т.д.). В настоящее время большинство коммерческих технологий электролиза воды используют кислотные или щелочные системы электролита для получения водорода. Типичная эффективность указана в диапазоне 55-74% с большинством коммерческих систем, имеющих КПД ниже 65%. Плотность тока обычно составляет около 0,3-0,4 А / см<sup>2</sup> и возникают технические трудности в поддержании электролитного баланса, а так же в поддержании водорода и кислорода. В настоящее время технология электролиза воды на основе полимерной мембраны электролита находится в разработке. Система электролиза ПОМ могут быстро реагировать на изменения энергозатрат и, следовательно,



может быть легко интегрирована с системами использования возобновляемых источников энергии. ПОМ работает при относительно низких температурах, как правило, при температуре 80 ° С или ниже, и, как правило, состоит из многочисленных ячеек, сложенных последовательно. Гийом Дусе и другие изучали общие характеристики интегрированной и автоматизированной силовой установки водорода (ВСУ).

Система состоит из фотоэлектрического модуля 0,46 Вт (PV), а электролизер 0,64 W включает в себя: протонообменную мембрану, генератор с переменным напряжением, флуоресцентную лампу 1000 Вт, два сосуда с емкостью 250 мл и устройства снимающую характеристику электролизера ПОМ, а также два пиранометра.

Основная часть блока ПОМ представляет собой мембранный электродный блок. Слой материала катализатора был применен к обеим сторонам тонкой протоно проводящей мембраны (ПОМ = протонная обменная мембрана). Эти два слоя образуют анод и катод электрохимической ячейки. Как мы видим на рисунке21, на стороне анода образуются газообразный кислород, электроны и ионы H +. Ионы H + проходят через мембрану к катоду и образуют газообразный водород с электронами, протекающими через внешний проводящий контур. Таким образом, электрическая энергия превращается в химическую энергию, и хранится в виде водорода и кислорода.

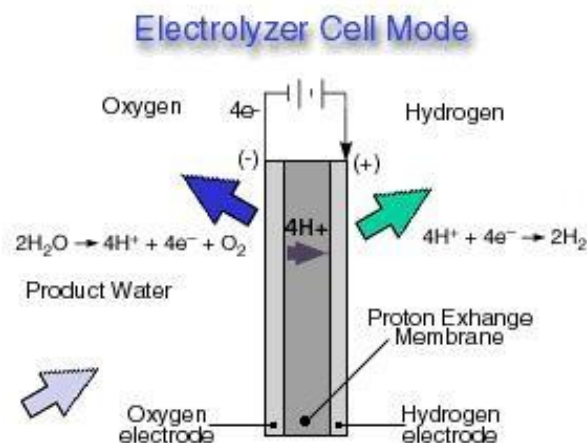


Рисунок 17 – Функциональный принцип электролизера ПОМ[13]

Oxygen– кислород; hydrogen– водород; product water–вода; proton exchange membrane – протонная мембрана;

Электролизер производит водород и кислород в соотношении 2: 1 (рисунок 17), объем выделяющегося водорода измеряется как функция от времени  $T$ . Начало отсчета времени происходит когда вода в газометре ( $H_2$ ), проходит нижний знак. Далее измеряется напряжение  $U$  и ток  $I$  во время электролиза.

Проделанный опыт в первую очередь должен показать, как меняется характеристика электролизера ПОМ при разных давлениях.

Экспериментальная установка приведена на рисунке 18.



Рисунок 18 – Лабораторная установка для получение водорода при помощи электролизера, работающего от генератора[9]

Далее, мы определяем объем полученного водорода при разных источниках энергии. Первый способ — это солнечная энергия. Второй способ состоит из имитации солнечной энергии при помощи лампы. Третий способ — это электролизер ПОМ генератора напряжения.

Результаты представлены в следующих пунктах. Во-первых, электролизер ПОМ работал двумя различными давлениями ( $P_{atm}$  и  $P = 3$  бар). Затем объем водорода производили с различными источниками электроэнергии (генератор, фотоэлектрический модуль, лампа дневного света). Наконец, мы вычислили эффективность для каждого случая.

Производительность электролизера ПОМ для двух различных давлений, показаны на рисунке 19.

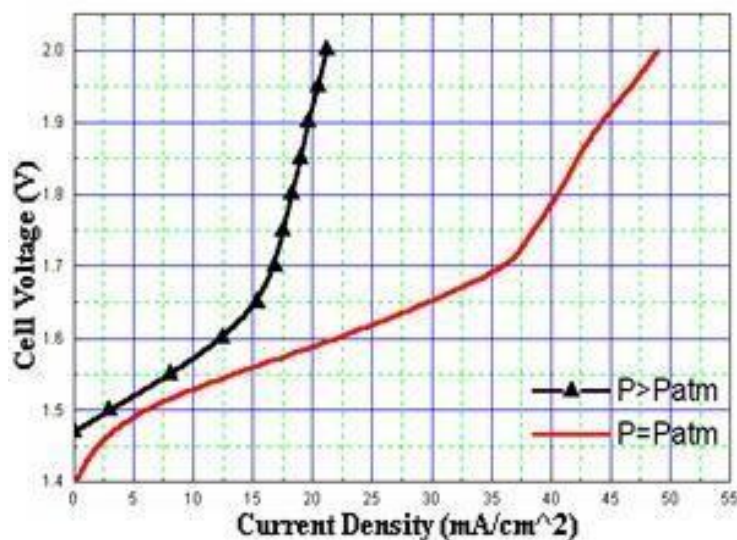


Рисунок 19 – Изменение напряжения элемента и плотность тока как функция давления [9]

На графике видно, что давление оказывает существенное влияние на производительность электролизера ПОМ. Эффект увеличения давления кислорода от 3 бар приводит к повышению напряжения 0,06 В и тока. Эти результаты показывают, что увеличение давления кислорода приводит к значительному улучшению в поляризации на катоде.

Полученные выводы:

– водород является чистым источником энергии. К тому же энергия необходимая для создания водорода требуется меньше, чем можно вывести из него.

– снижение зависимости от ископаемых и ядерных источников энергии освободит страну от дорогостоящего иностранного участия и улучшения здоровья и благосостояния его граждан. Это будет достигнуто за счет значительного сокращения выбросов парниковых газов и количества других ядов, относящихся к ископаемым и ядерным источникам энергии в воздухе, земле и воде.

–солнечная энергия может служить источником питания электролизера для получения водорода. Водород будет храниться в накопителях для запуска ТЭ, когда солнечной энергии будет не хватать для обеспечения электричеством потребителя

## 2.7 Разработка систем хранения водорода на основе сложных гидридов металла

В этом обзоре описываются последние исследования в области разработки резервуара на основе сложных гидридов металла для термолиза и гидролиза. Коммерческие применения с использованием сложных гидридов металла ограничены, особенно для систем на основе термолиза, где до сих пор выполнялись только демонстрационные проекты. Системы на основе гидролиза находят свое применение в космических и военных отраслях благодаря их совместимости с топливными ячейками с протонной мембраной.

Для термолиза были разработаны резервуары, содержащие преимущественно алюмогидрид натрия, и несколько примеров с нитридами.

Для гидролиза предпочтительным материалом является боргидрид натрия, в то время как аммиак оказался менее эффективным. Утилизация отработавшего топлива боргидрида натрия остается важной частью их коммерческой жизнеспособности.

За последние 15 лет комплексные гидриды алюминия и бора были исследованы в качестве возможных материалов для хранения водорода. Хотя

состав этих материалов похожие, но химическое поведение совершенно иное. Пример некоторых сложных гидридов алюминия ( $\text{NaAlH}_4$ ,  $\text{KAlH}_4$ ,  $\text{Na}_3\text{AlH}_6$  и т. д.). Эти гидриды можно разлагать при повышенных температурах, и при технически значимых условиях с использованием катализаторов, а также можно проводить повторное дегидрирование. Однако температура разложения комплексных гидридов бора ( $\text{LiBH}_4$ ,  $\text{NaBH}_4$ ) часто намного выше, и обратимость не может наблюдаться в условиях, используемых для сложных гидридов алюминия. Следовательно, сложные гидриды алюминия могут быть использованы для технических применений, где важным условием является повторное дегидрирование материала для хранения водорода. А сложные гидриды бора предпочтительны для систем картриджей, которые высвобождают водород в реакции гидролиза при температуре окружающей среды. Эти различные свойства приводят к совершенно различным техническим требованиям. Это делает разработку систем хранения на основе алюминиевых или боргидридных соединений сложной задачей.

Термолиз требует ввода тепла, и при проектировании бака-накопителя необходимо соблюдать осторожность, чтобы эффективно распределять тепло. С другой стороны, гидролиз требует не только эффективного смешения сложного гидрида и воды, но также разделения полученного газообразного водорода и суспензии, состоящей из продукта разложения и воды. В то время как системы термолизных баков разрабатываются в демонстрационных проектах. Системы гидролизных накопителей уже нашли применение в реальных условиях.

### 2.7.1 Термолиз

Разработка резервуара для хранения водорода на основе гидридов включает в себя различные уровни исследования. Первый уровень предусматривает испытание материалов в лабораторных условиях. Как

только соответствующие материалы были выбраны, создается методика оценки. Методика основывается на двух составляющих. Первое это моделирование полномасштабной системы, а второе –изготовление опытного образца, чтобы экспериментально оценить работу материала и проверку результатов моделирования.

### 2.7.2 Исследование и моделирование различных емкостных систем термолиза

Харди С.Н. и Антон И.Н разработали иерархическую методику загрузки водорода с целью уточнения рабочих параметров. Их методология состоит из четырех подмоделей: первая модель это оценка кинетики, вторая модель оценка геометрии, разработана для уточнения шкалы длины в заданной геометрии резервуара; третья модель скользящего теплообмена, разработанная для расчета расхода и температуры теплоносителя, падения давления, коэффициентов теплоты конвекции и повышения температуры вдоль канала охлаждения; и четвертая это двух и трех мерная модель конечных элементов, построенная с использованием ранее оптимизированных параметров (от 1 до 3) в качестве входных параметров.

Модель была использована для оценки детальных характеристик для системы  $\text{NaAlH}_4$ , но может быть также адаптирована для других систем, если будет предоставлена надлежащая кинетическая модель.

Пфайфер Р. и его коллеги исследовали тепловую связь между топливным элементом с высокой температурой протонной обменной мембраны (НТ-РЕМ) и резервуаром алюмогидрида натрия (2 кг) с использованием имитационных исследований для определения параметров, влияющих на эффективность и на запуск во время выделения водорода. В моделировании использовалась кинетическая модель Гросса. Авторы подчеркивали, что кинетика разложения является предельным параметром эффективности клетки. Обнаружена оптимальная рабочая температура  $185^\circ$

С с мощностью топливного элемента 1 кВт. Минимальная рабочая температура была оценена при 120 °С с суммарным выходом 0,8 кВтч.

Бьюри П. провел оптимизацию двух различных конфигураций резервуаров, а именно систему оболочек, труб, гидридов и многотрубного реактора, оборудованная ребрами. Иерархическая методология, разработанная Харди и Антоном, использовалась с кинетической моделью UTRCTM. Цель конфигурации состояло в оптимизации толщины ребер и количество теплообменников, как при загрузке, так и при разгрузке. Было показано, что толщина ребер не влияла на процесс загрузки. Однако во время разряда скорость и количество выделения водорода улучшались за счет использования более толстых ребер. В конце концов, это уменьшило гравиметрическую и объемную емкость. Влияние количества, толщины и клиренса ребер на поглощение водорода оценивали в конфигурации. Авторы пришли к выводу, что увеличение количества ребер и уменьшение зазоров благотворно сказывается на скорости загрузки за счет водородной емкости. Оптимизированная конфигурация (шесть ребер, толщина 0,1 см и зазор 0 см) привела к улучшению скорости загрузки на 41%. Таким образом, оптимизация системы была основана на компромиссе между скоростью загрузки и вкладом ребер в общий вес.

Влияние эксплуатационных параметров при заправке водорода в емкость с продольными ребрами и охлаждающим теплообменником было рассмотрено Раджером и Кумаром. Геометрия бака была принята Хардином и Антоном. Был выполнен анализ чувствительности для оценки влияния начальной температуры слоя, давления подачи, расхода охлаждающей жидкости, температуры охлаждающей жидкости и теплопроводности. Кинетическая модель была принята Лореном и Гроссом. Было выбрано рабочее давление 15 МПа, чтобы поддерживать оптимальную температуру 420 - 450 К и расход охлаждающей жидкости 25 л/мин при температуре 380 К. Наилучшая конфигурация потребовала увеличения теплопроводности на 8

$V_T \cdot m^{-1} \cdot K^1$  за счет уплотнения с добавлением усилителя электропроводности (алюминия или графита).

Моделирование было выполнено для многотрубного резервуара с использованием кинетической модели Лозена. Влияние внутреннего диаметра, уплотнение и добавление расширенного природного графита (ENG) оценивали в соответствии с водородной емкостью во время загрузки (здесь в качестве ограничения использовалось 4,5 кг H<sub>2</sub> за 10 мин). Оптимизированная конфигурация для резервуара с внутренним диаметром 35 мм с уплотненным порошком и без добавки ENG была определена при 10 МПа и 130°C. Эффект добавления графита и конструкция теплообменника были также изучены Джонсоном. Моделирование проводилось с использованием первой кинетической модели, основанной на экспериментально определенных параметрах.

В 2014 г. был разработан сравнительный анализ устойчивости с использованием кинетической модели от Лозена. Авторы оценили, основываясь на движущей силе для каждого под процесса (перенос водорода, внутренняя кинетика и теплоперенос), сопротивление в процессе сорбции водорода. Авторы подчеркивали, что перенос водорода имеет незначительный эффект (независимо от размера реактора), внутренняя кинетика играет решающую роль в небольшой ячейке (2 мм), а теплопередача является основным сопротивлением при поглощении и увеличении бака. Следовательно, в системе резервуаров, необходимо улучшение теплопередачи.

Ренонд С. и другие дали всесторонний обзор при добавлении различных компонентов в резервуар для металлгидридного накопителя. Более высокая плотность порошкообразного материала может улучшить ограничения по теплопроводности и объемной емкости. Так же они обнаружили, что уплотнение материала является наиболее влиятельным фактором для оптимизации водородной емкости накопителя.



В их работах представлен краткий обзор систем хранения водорода, которые были опубликованы на основе аланата натрия, амидов металлов, борана и алана аммиака. Усилия в области исследований и разработок направлены на улучшение объемной производительности, эффективности управления теплом и снижение общей стоимости систем.

### 2.7.3 Натриевые системы на основе ацетата натрия

Беллоста фон Колбе со своими коллегами продемонстрировали функциональность 8-килограммового резервуара при абсорбции и десорбции с максимальным временем поглощения менее 10 мин.

Данный накопитель получил быструю скорость зарядки водородом за счет добавления ацетата натрия. Это открыло путь для хранения водорода на базе комплексных гидридов, где источник доступного тепла отработавших газов совместим с энергетическими потребностями резервуара (особенно в отношении уровня температуры). Это особенно касается крупномасштабных и стационарных применений.

Уц А. и его коллеги изучали поведение порошкообразного слоя, содержащего  $\text{NaAlH}_4$ , в лабораторном резервуаре для хранения водорода с

Данный накопитель (рисунок 20) изготовлен из алюминиевого сплава для уменьшения веса, разработанная в ИЭиЭ (Институт энергетики и экологии, Германия) и Институт исследований Макса Планка. Теплопередача осуществлялась через поток масла в байонетном теплообменнике, изготовленном методом экструзионного формования из алюминиевого сплава. Резервуар для хранения водорода объемом 0,21 кг высвободил и поглотил 3,6 г (1,7 мас.%) водорода при температуре примерно 450 К. Испытание с 45 циклами (гидрирование и дегидрирование) проводилось без каких-либо сбоев в накопителе и в его компонентах. Работа резервуара в реальных условиях показала возможность применения со стационарными системами топливных элементов.



Рисунок 20 - Накопитель водорода[20]

#### 2.7.4 Гидролиз

Выпуск водорода может также произойти из-за воздействия тепла посредством гидролиза реакцией с водой. Значительное количество работ было инвестировано в экспериментальной проверке системы гидролиза комплексных гидридов металла. Боргидрид натрия  $\text{NaBH}_4$ , является одним из самых проверенных материалов для гидролиза.  $\text{NaBH}_4$  был впервые обнаружен в 1940 году Шлезингером и Брауном, но работа была засекречена и не публиковалась до 1953 года.  $\text{NaBH}_4$  имеет содержание водорода около 10,8 % и является единственным компонентом гидролиза, которая до сих пор применяется.

### 2.7.5 Разработка резервуара для гидролиза на основе реактора

Экспериментальные системы гидролиза основаны на двух различных конструкциях накопителя. В накопителе периодического действия смешиваются два компонента гидрид бора и катализатор с водой. В проточном резервуаре, раствор гидрид бора передается через твердый слой катализатора с последующим разделением полученного водорода и побочного продукта. Поскольку растворимость  $\text{NaBH}_4$  в щелочных водных растворах значительно выше, чем для  $\text{NaBO}_2$ , то в этих системах, концентрация раствора гидрида бора создает проблемы. Гидролиз реакция также может возникнуть в результате реакции между паром и твердым гидридом бора. Использование пара может уменьшить количество воды, тем самым улучшая общее хранилище энергии системы [20].

#### Выводы:

Таким образом преимущества реализации водородной системы на топливных элементах с металлогидридным накопителем привлекают все больше внимание. Так как эту систему с легкостью можно использовать как в промышленном производстве, так и для жилых зданий. Он безопасен для окружающей среды, не токсичен. Не несет ни малейшей угрозы человеку и животным. Водород без проблем транспортируется и хранится в металлогидридном накопителе, не опасаясь за жизнь.

### 3. Сравнение классических систем энергообеспечения и водородной системы автономного энергообеспечения малой мощности до 5 квт.

«Резервное энергообеспечение (РЭ)– достаточно хороший способ обеспечить электричеством потребителя. Однако содержит в себе целый ряд проблем, связанных с работой самих систем резервного электропитания. Хотя и виден прогресс в реализации отдельных элементов резервного энергообеспечения, но добиться существенного улучшения эксплуатационных характеристик систем в целом пока не удается. Это связано, в частности, с практически неизменной структурой данных систем»[11].

«Из–за случаи масштабных отключений электроэнергии в разных странах модернизация резервного энергообеспечения свелась только к наращиванию времени автономной работы путем увеличения емкости аккумуляторов, соответствующего увеличению мощности дизельного генератора, обновления систем управления и мониторинга» [11].

«Таким образом «новые» СРЭ унаследовали все структурные качества и недостатки условно старых систем. СРЭ широко применяются практически во всех сферах, где обеспечение непрерывного электроснабжение является обязательным условием нормального функционирования. Это системы связи, и в особенности, оборудование операторов мобильной связи» [11]. «К этому классу относятся также оборудование и системы для критических приложений: медицинские системы жизнеобеспечения, банковские расчетно-информационные системы, дата-центры (ЦОД), системы правительственной и ведомственной связи, системы управления наземным и воздушным транспортом и т.п» [12].

«Очевидные преимущества реализации водородной системы энергообеспечения на топливных элементах по сравнению с

«классическими» системами на аккумуляторах и дизельных генераторах привлекают все больше внимание» [11].

### 3.1 Структура существующих систем резервного энергообеспечения на базе аккумулятора и дизельного генератора

«При всем разнообразии реализаций функциональные элементы существующих СРЭ остаются неизменными: ИБП обеспечивающий переход на резервное питание от АКБ при недопустимых изменениях параметров силовой сети (изменении напряжения, изменения частоты, превышении допустимого уровня помех, кратковременные пропадания напряжения, длительное пропадание напряжения). Ключевым элементом ИБП является блок АКБ. Емкость АКБ определяет время автономной работы от аккумулятора»[11].

«ДГУ с автоматическим пуском. При разряде АКБ до установленного уровня происходит переключение на питание от ДГУ. При этом, обеспечивается питание всех потребителей и зарядка аккумуляторов ИБП. Длительность работы ДГУ определяется запасом дизтоплива»[11].

#### 3.1.1 Недостатки существующих СРЭ

«Ключевыми элементами существующих (наиболее распространенных) СРЭ являются АКБ и ДГУ» [10].

«Основными недостатками существующих систем СРЭ (АКБ + ДГУ) являются неоптимальные режимы эксплуатации как АКБ, так и ДГУ в составе этих систем. В результате, как правило, происходит профилактическая замена АКБ и/или ДГУ в СРЭ до реальной выработки ресурса» [9].

«Еще одним недостатком АКБ является практическая невозможность определения реального срока службы. Аккумуляторы начинают «работать» с

момента изготовления. Для всех типов аккумуляторов производители указывают «гарантированный» срок службы. Вместе с этим, этот срок обеспечивается при соблюдении определенных условий хранения, транспортировки и эксплуатации» [10]. «При этих условиях сложилась практика превентивной замены АКБ через 3-4 года для аккумуляторов с паспортным сроком службы до 10-15 лет. Такая практика вполне оправдана т.к. в СРЭ аккумуляторы эксплуатируются в крайне «неоптимальном» режиме»[14]. «Отсутствие естественного цикла заряд-разряд, невозможность обеспечить рекомендованные токи заряда-разряда, возможность нарушения климатических условий эксплуатации и т.п» [11].

«Серьезной проблемой для АКБ в СРЭ является повторное отключение питания после разряда батареи и переходе на питание от ДГУ. (Для АКБ, рассчитанной на работу 4-8 часов время заряда составляет 10-16 часов). В этом случае переключение на разряженную батарею невозможно и происходит переключение на ДГУ. Повторение такого режима приводит к переходным процессам, которые могут стать причиной выхода из строя элементов СРЭ» [11].

«Значительная часть установленных СРЭ включают АКБ с оптимальным рабочим температурным диапазоном (+18 - +23) °С. Это означает, что для поддержания такого температурного режима необходимы дополнительные затраты электроэнергии для питания кондиционеров. В режиме питания от АКБ – это означает, что часть своей энергии батарея тратит на обеспечение собственного температурного режима, а не на питание оборудования» [11].

### 3.1.2 Проблемы ДГУ в составе СРЭ.

«Проектная мощность ДГУ в составе СРЭ значительно превышает номинальную мощность оборудования, т.к. при переключении на ДГУ необходимо обеспечить и заряд АКБ, и питание оборудования. При этом практически не удастся эксплуатировать агрегат в оптимальном диапазоне мощностей (50-70 % от номинальной мощности для большинства моделей ДГУ)» [8].

«ДГУ представляет собой электромеханическую систему, нуждающуюся в проведении регулярных профилактических работ. Типичная периодичность – раз в квартал. Это значит, что ДГУ – это обслуживаемый агрегат. В этом случае, не обслуживаемость остального оборудования на той же площадке перестает быть существенным преимуществом» [11].

«Единственная возможность убедиться в работоспособности ДГУ – это пробный пуск. На практике это означает, что периодически расходуются ресурсы: механический ресурс, топливо, ресурсы обслуживающего персонала» [11].

«Выявление проблем в работе ДГУ может потребовать ремонта/замены агрегата. Это означает, что на время проведения работ по ремонту/замене ДГУ СРЭ теряет 100% своей функциональности» [10].

«Дополнительная проблема – для старта ДГУ необходим свой собственный аккумулятор со всеми проблемами, сопутствующими режиму эксплуатации АКБ с длительными перерывами» [11].

### 3.2 СРЭ на базе водородной системы автономного энергообеспечения.

«Система резервного электроснабжения на ТЭ заменяет собой сразу два элемента традиционных систем таких как – аккумулятора и дизельного генератора. Это повышает общую надежность системы и исключает неблагоприятные режимы переключения с АКБ на ДГУ и обратно» [11].

«Для сравнения рассмотрим систему на топливных элементах с протонно-обменной мембраной (ТЭПМ). Выбор этого типа ТЭ основан на проработанности этой технологии и наличии на рынке коммерчески доступных систем на базе таких топливных элементов» [11].

«Принцип действия системы – прямое преобразование химической энергии в электрическую. Топливом для системы служит водород» [11].

### 3.2.1 Преимущества водородной системы.

«Система начинает вырабатывать электроэнергию после поступления топлива (водорода). Время автономной работы системы определяется только запасами топлива. Переключение на питание от резервной ТЭ системы при пропадании магистрального питания происходит мгновенно»[11].

«Водородной системы энергообеспечения является практически необслуживаемой (замена воздушных фильтров – раз в 2 года). Система не требует поддержки особого микроклимата. Система не создает загрязнения окружающей среды (продуктом реакции является вода). Высокая энергетическая эффективность системы» [11] (типичные значения КПД – 60%).

### 3.3 Оценочный анализ классических систем и водородной системы

Проведем оценочный анализ стоимости и обслуживания за 10 лет эксплуатации классических систем электропитания мощностью до 5кВт (дизельный генератор, свинцово кислотный аккумулятор) и водородную электростанцию с учетом того, что отсутствует энергоснабжение дома от внешней ЛЭП (линии электропередач).

Далее приведем таблицу 5, в которой указано, сколько электроэнергии потребляют электрические приборы. Набор электроприборов, приведенных в



таблице 5, соответствует количеству приборов для среднестатистической семьи из 3 человек.

Таблице 5 – Потребление электроэнергии электрическими приборами

Электроприборы	Мощность электроприемника, кВт	Количество, шт.	Среднесуточное время работы, час/сут.	Месячное потребление электроэнергии, кВт.ч
Сколько электроэнергии потребляет холодильник	1	1	2 (с учетом остановок)	60
Сколько электроэнергии потребляет телевизор	0,08	1	5	12
Сколько электроэнергии потребляет стиральная машина	1,5	1	0,57 (4 ч. в неделю)	26
Сколько электроэнергии потребляет электро чайник	2	1	0,25	15
Сколько электроэнергии потребляет компьютер	0,15	1	2	9
Сколько электроэнергии потребляет пылесос	0,8	1	0,14 (1 ч. в неделю)	3

Продолжение таблицы 5				
Сколько электроэнергии потребляет уют	1	1	0,29 (2 ч. в неделю)	9
Сколько электроэнергии потребляет микроволновая печь	1	1	0,20	6
Сколько электроэнергии потребляет освещение (лампы накаливания)	0,06	10	3	44
ИТОГО				184

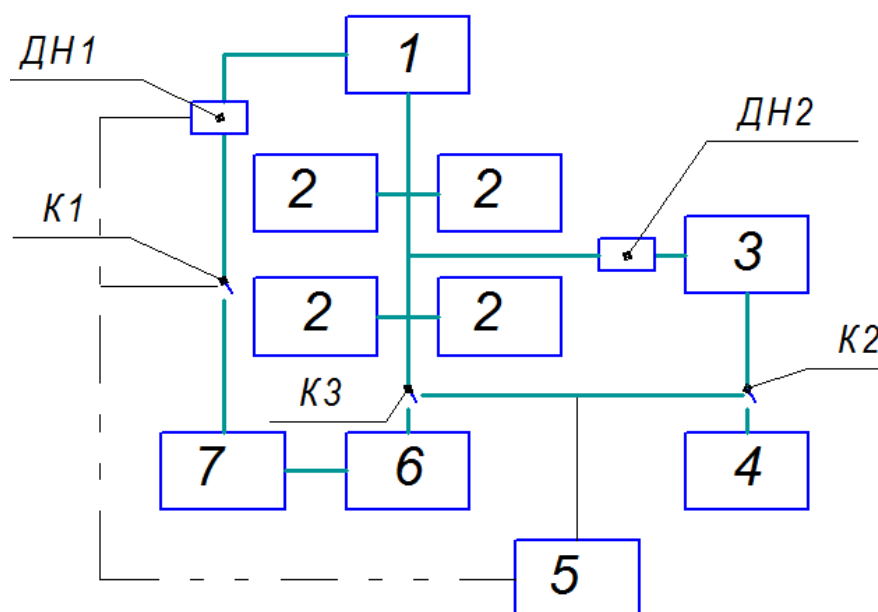
Из этой таблицы можно увидеть, что потребляемая энергия в среднем составляет 5 кВт в сутки и с пиковой нагрузкой 5,5 кВт\*ч.

### 3.3.1 Дизельный генератор с буферным АКБ

В составе рассматриваемой системы входят:

- дизельный генератор;
- блок свинцово-кислотных аккумуляторов;
- зарядное устройство для заряда АКБ;
- инвертор (преобразователь напряжения АКБ в ~220Вольт).

Схема данной системы представлена на рисунке 21.



1—внешний источник; 2—АКБ; 3—зарядное устройство для заряда АКБ;  
4—дизельный генератор; 5—ЭБУ; 6—инвертор; 7—потребитель; ДН1, ДН2—  
датчик напряжения; К1, К2, К3— ключ цепи

Рисунок 21—Схема автономной гибридной установки энергообеспечения на базе дизельного генератора с буферным АКБ

Установка работает следующим образом. Первым контуром схемы является внешний источник, которая является линия электропередач. Работа ее заключается в энергообеспечении потребителя и хранение заряда в АКБ при выработке лишней электроэнергии. Вторым контуром схемы является блок АКБ номинальной мощностью 5 кВт·ч, которая обеспечивает потребителя электроэнергией при отсутствии электроэнергии от внешнего источника. Третьим контуром схемы является дизельный генератор мощностью 5кВт, задача которого, является поддержании заряда в АКБ.

Дизельный генератор Champion DG6500ES (рисунок 22) мощностью до 5кВт. Средняя цена данного генератора составляет 78 300 руб [12].



Рисунок 22– Дизельный генератор Champion DG6500ES

Технические характеристики генератора приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристика генератора Champion DG6500ES

Объем двигателя	418 куб.см
Мощность двигателя	8.5 л.с.
Активная мощность	5 кВт
Объем бака	15 л
Расход топлива	1.4 л/ч

Эксплуатация дизельного генератора предполагает затраты на топливо, масло и фильтры, поэтому приведем расчеты затрат, которые приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет затрат на топливо за год эксплуатации

	Время работы, ч	Топливо, литры	Цена, руб
День	6	6	237

Продолжение таблицы 7			
Месяц	180	180	7110
Год	2160	2160	85320

Затраты за год составят:

1) Топливо - 85 320 □

2) Масло - 12 400□

3) Фильтры - 6 800 □

В таблице 8 приведены затраты на топливо, расходные материалы (масло, фильтры) в течении 10 лет эксплуатации, с учетом срока службы дизельного генератора, который составляет 7 лет.

Таблица 8 – Затраты на топливо и расходные материалы в течении 10 лет эксплуатации дизельного генератора

Год эксплуатации	Цена владения, рубли
1	182420
2	286540
3	390660
4	494780
5	598900
6	703020
7	807140
8	989560
9	1093680
10	1197800

Аккумулятор FIAMM 12 FLB 800 ( рисунок 23 ) мощностью 1680 Вт. Средняя цена данного аккумулятора составит 39 071 □ [13].

С учетом требуемой мощностью нам нужно 4 аккумулятора. Тогда цена составит 156 284 □.



Рисунок 23– Аккумулятор FIAMM 12 FLB 800

Технические характеристики аккумулятора приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики аккумулятора

Напряжение, В	12	Высота с клеммой, мм	236
Емкость, Ач	140	Высота, мм	235
Толщина, мм	500	Технология	AGM
Ширина, мм	226	Страна изготовления	Италия
Высота, мм	235	Гарантия, мес	12

В таблице 10 приведены затраты на аккумулятор в течении 10 лет эксплуатации, с учетом срока службы, который составляет 4 года.

Таблица 10 – Затраты на аккумулятор в течении 10 лет эксплуатации

Год эксплуатации	Цена владения, рубли
1	156284
2	156284
3	156284
4	312568
5	312568
6	312568
7	468852
8	468852
9	468852
10	625136

Зарядное устройство 20А Zenith ZHF2420 ( рисунок 24 ) мощностью 480 Вт. Средняя цена данного аккумулятора составит 21 500 □ [14]. Для того что бы зарядить 3 аккумулятора за 6 часов понадобится 3 зарядных устройства. Цена составит 64 500 □.



Рисунок 24– Зарядное устройство 20А Zenith ZHF2420

Технические характеристики зарядное устройство приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Технические характеристики зарядное устройство

Мощность, Вт	480
Номинальное напряжение заряжаемых АКБ, В	24
Максимальный ток заряда, А	20
Ёмкость заряжаемых обслуживаемых АКБ, Ач/5ч	от 80 до 240

Инвертор SILA 6000M ( рисунок 25 ) мощностью 6 кВт. Средняя цена данного инвертора составит 70 000 руб [15].



Рисунок 25– Инвертор SILA 6000M

Технические характеристики зарядное инвертора в таблице 12.

Таблица 12 – Технические характеристики инвертора

Тип устройства	Бестрансформаторный
Мощность	6000Вт



Продолжение таблицы 12	
Пиковая мощность	10000ВА / 8000 Вт (< 5 сек )
Входное напряжение	48 В
Форма выходного сигнала	Чистый синус

Далее в таблицы 13 приведены затраты на автономную гибридную установку энергообеспечения на базе дизельного генератора с буферным АКБ в течении 10 лет эксплуатации.

Таблица 13 – Затраты на систему в течении 10 лет эксплуатации

Год эксплуатации	Цена владения, рубли
1	446204
2	550324
3	654444
4	914848
5	1018968
6	1123088
7	1383492
8	1565912
9	1670032
10	1930436

В итоге, за год эксплуатации системы на дизельном генераторе с буферным АКБ обойдется в 446 204 руб.

Цена владения установкой за 10 лет составит 1930436 рублей.

1 кВт будет стоить 72,4 рублей.

### 3.3.2 Бензиновый генератор на газовом топливе с буферным АКБ

В составе рассматриваемой системы входят:

- бензиновый генератор на газовом топливе;
- блок свинцово-кислотных аккумуляторов (АКБ);
- зарядное устройство для заряда АКБ;
- инвертор (преобразователь напряжения АКБ в ~220Вольт).

Схема и работа установки схожа с предыдущей системой.

Бензиновый генератор KIPOR KGE6500E/X ( рисунок 26 ) мощностью до 5 кВт. Средняя цена данного генератора составит Цена 57 860 □ [15].



Рисунок 26– Бензиновый генератор KIPOR KGE6500E/X

Технические характеристики генератора приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Характеристика генератора KIPOR KGE6500E/X

Мощность, кВт	5,5
Частота, Гц	50
Напряжение, В	230 / 12
Сила тока, А	21,8
Расход топлива, л/ч	2

Эксплуатация бензинового генератора предполагает затраты на топливо, масло и фильтры, поэтому приведем расчеты затрат, которые приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Расчет затрат на топливо за год эксплуатации

	Время работы, ч	Топливо, литры	Цена, руб
День	6	12	452,4
Месяц	180	360	13572
Год	2160	4320	162864

Затраты за год:

- 1) Топливо – 162 864 □;
- 2) Масло – 18 000 □;
- 3) Фильтры – 7 700 □.

В таблице 16 приведены затраты на топливо, расходные материалы (масло, фильтры) в течении 10 лет эксплуатации, с учетом срока службы бензинового генератора, который составляет 7 лет.

Таблица 16 – Затраты на топливо и расходные материалы в течении 10 лет эксплуатации бензинового генератора

Год эксплуатации	Цена владения, рубли
1	152680
2	247500
3	342320
4	437140
5	531960
6	626780

7	721600
8	874280
9	969100
10	1063920

Остальные части установки такие же как в предыдущей системе.

Далее в таблицы 17 приведены затраты на автономную гибридную установку энергообеспечения на базе бензинового генератора с буферным АКБ в течении 10 лет эксплуатации.

Таблица 17 – Затраты на систему в течении 10 лет эксплуатации

Год эксплуатации	Цена владения, рубли
1	416 464
2	488 184
3	583 004
4	834 108
5	928 928
6	1 023 748
7	1 274 852
8	1 427 532
9	1 522 352

В итоге, за год эксплуатации системы на бензиновом генераторе на газовом топливе с буферным АКБ обойдется в 416464 руб.

Цена владения установкой за 10 лет составит 177345рублей.

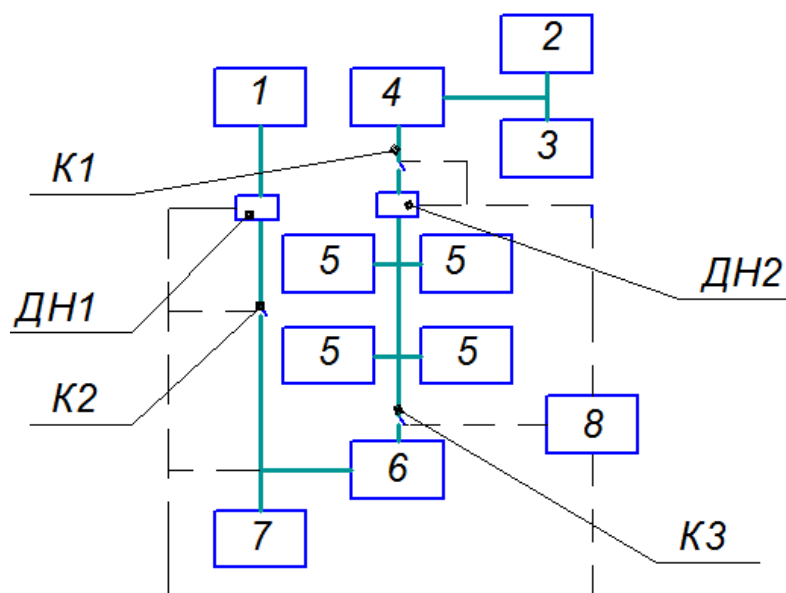
1 кВт будет стоить 66,6 рублей

### 3.3.3 Ветро-солнечная электростанция с АКБ

В составе рассматриваемой системы входят:

- солнечная батарея;
- ветреной генератор;
- блок свинцово-кислотных аккумуляторов (АКБ);
- зарядное устройство для заряда АКБ;
- инвертор (преобразователь напряжения АКБ в ~220Вольт).

Схема ветро-солнечной электростанции с АКБ представлена на рисунке 27.



1–внешний источник; 2–ветро-генератор; 3–солнечная батарея; 4– зарядное устройство для заряда АКБ; 5–АКБ; 6–инвертор; 7–потребитель; 8– ЭБУ; ДН1, ДН2– датчик напряжения; К1, К2, К3– ключ цепи

Рисунок 27–Схема автономной гибридной установки энергообеспечения на базе ветро-солнечной электростанции с АКБ

Установка работает следующим образом. Первым контуром схемы является внешний источник, которая является линия электропередач. Работа

ее заключается в энергообеспечении потребителя. Вторым контуром схемы является блок АКБ номинальной мощностью 5 кВт·ч, которая обеспечивает потребителя электроэнергией при отсутствии электроэнергии от внешнего источника. Третьим контуром схемы является ветро-солнечная электростанция 5кВт, задача которого, является поддержании заряда в АКБ тем самым обеспечения электричеством потребителя.

Солнечная батарея SilaSolar ( рисунок 28) мощностью 300 Вт. Средняя цена одной солнечной батареи составит 12 500 руб [17]. Для того что бы зарядить аккумуляторы и обеспечить электричеством дом, понадобится 13 солнечных батареи. Цена составит 162 500 руб.



Рисунок 28– Солнечная батарея SilaSolar

Технические характеристики солнечной батареи приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Характеристика солнечной батареи

Тип устройства	Монокристаллический
Мощность	300 Вт
Рабочий вольтаж	37,0 В
Рабочий ток	8,1 А
Эффективность модуля, %	17,12

Ветреной генератор Condor Home ( рисунок 29) мощностью 3 кВт.  
Средняя цена ветреной генератора составит 260 000 □ [8].



Рисунок 29 – Ветреной генератор Condor Home

Технические характеристики ветреного генератора приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Характеристика ветреного генератора

Мощность при 9 м/с	3000 Вт
Напряжение	12/24 В
Стартовая скорость ветра	2 м/с
Диапазон работы	3-25 м/с (от 20 м/с срабатывает защитное торможение)
Количество лопастей	3 шт.
Материал лопастей	Композит (полиэфирная смола+стекловолокно)
Диаметр ротора	3,7 м.
Срок службы	не менее 20 лет.

Остальные части установки такие же как в предыдущей системе.

Далее в таблицы 20 приведены затраты на автономную гибридную установку энергообеспечения на базе ветро-солнечной электростанции с АКБ в течении 10 лет эксплуатации.

Таблица 20 – Затраты на систему в течении 10 лет эксплуатации

Год эксплуатации	Цена владения, рубли
1	693 284
2	693 284
3	693 284
4	849 568
5	849 568
6	849 568
7	1 005 852
8	1 005 852



9	1 005 852
10	1 162 136

В итоге, за год эксплуатации системы на ветро-солнечной электростанции с АКБ обойдется в 693 284 □.

Цена владения установкой за 10 лет составит 1 162136 рублей.

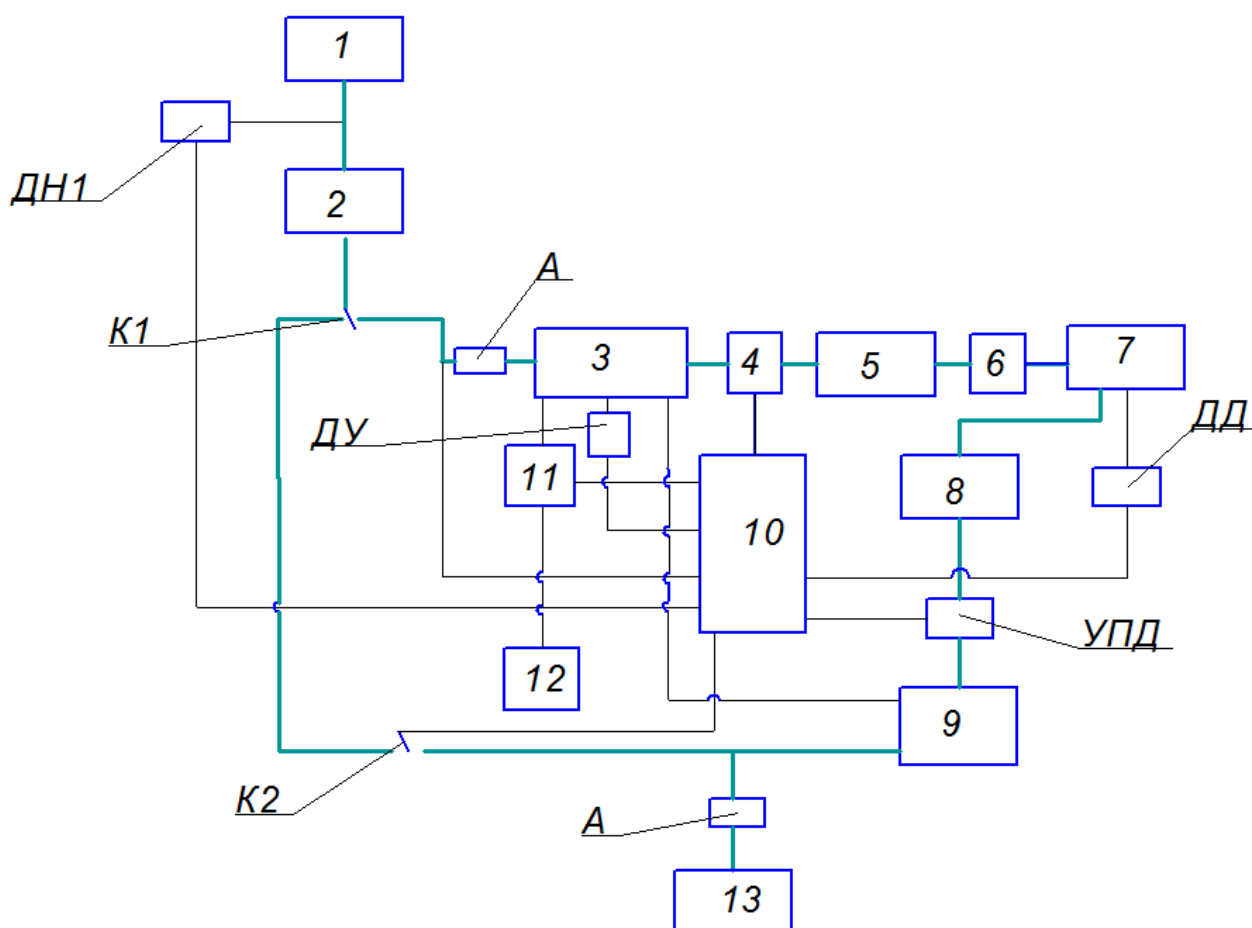
1 кВт будет стоить 43,62 рублей

### 3.3.4 Автономная гибридная установка энергообеспечения на базе водородной электростанции

В составе рассматриваемой системы входят:

- генератор водорода;
- модуль на топливных элементах;
- инвертор (преобразователь напряжения в ~220Вольт);
- металлгидридный накопитель.

Схема водородной электростанции представлена на рисунке 30.



1–внешний источник; 2– стабилизатор напряжения; 3–генератор водорода;4– осушитель; 5–компрессор; 6–Обратный клапан;7–металлогидридный накопитель;8–редуктор;9–топливный элемент;10–ЭБУ;11–клапан подачи дистиллированной воды; 12–Н<sub>2</sub>O; 13–потребитель; А–амперметр; ДН1– датчик напряжения; К1, К2– ключ цепи; ДУ– датчик уровня; УПД– управление подачи водорода; ДД– датчик давления

Рисунок 30–Схема автономной гибридной установки энергообеспечения на базе водородной электростанции

Установка работает следующим образом. Первым контуром схемы является внешний источник, которая является линия электропередач. Работа ее заключается в энергообеспечении потребителя. Вторым контуром схемы является водородная электростанция номинальной мощностью 5 кВт·ч,

которая обеспечивает потребителя электроэнергией при отсутствии электроэнергии от внешнего источника.

Модуль на топливных элементах Dantherm Power DBX5000 приведен на рисунках 32,33 - мощностью 5 кВт. Средняя цена топливного элемента составит 550 000 руб [19].



Рисунок 32– Модуль на топливных элементах Dantherm Power DBX5000



Рисунок 33 – DBX 5000 установленный в стойке, в закрытом помещении

Технические характеристики топливного элемента приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Технические характеристики DBX5000

Производительность	5000 Ватт
Выходное напряжение VDC	47 - 53 VDC (48VDC)
Входное напряжение VAC	90 – 264 / 50-60Hz
Давление на входе в блок клапанов	5 bar
Длительность работы на одном баллоне из расчета использования 40 литрового баллона	≈ 150 мин
Требования к окружающей температуре	-0 ° до +40 °С (опционально -20 ° до +50 °С)
Требования к влажности	5-95% без конденсата
Диапазон высоты	до 3000м над уровнем моря
Наличие вредных выбросов	нет

Генератор водорода ЦветХром-16( рисунок 334). Средняя цена генератора составит 160000 □ [20].



Рисунок 34 – Генератор водорода

Технические характеристики генератора приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Технические характеристики генератора водорода

Чистота водорода в пересчете на сухой газ, % об	99,995
Концентрация водяных паров при 20С и 1 атм, не более, ppm	5
Суммарная производительность по водороду, приведенная к нормальным условиям, л/ч	16
Диапазон задаваемого выходного давления водорода, атм	от 1,5 до 6,1 атм
Стабильность выходного давления водорода, не хуже, атм	$\pm 0,02$
Время установления рабочего режима, не более, мин	30
Объем заливаемой дистиллированной воды, л	1,0

Продолжение таблицы 23	
Расход дистиллированной воды, не более, л/час	0,01
Потребление воды, г/л водорода	1,6
Средний ресурс сменного картриджа деионизационного фильтра (при максимальной производительности и односменной работе) не менее	1 год
Средняя потребляемая мощность:	
не более, Вт	250
Температура окружающего воздуха, С,	от +10 до +35

Эксплуатация генератора водорода предполагает затраты на воду, поэтому приведем расчеты затрат, которые приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Расчет затрат на воду за год эксплуатации

	Время работы, ч	Вода, литры	Цена, руб
День	10	0,1	0,1
Месяц	2100	21	21
Год	25200	252	252

В таблице 25 приведены затраты на воду в течении 10 лет эксплуатации.

Таблица 25 – Затраты на воду в течении 10 лет эксплуатации

Год эксплуатации	Цена владения, рубли
1	252
2	504
3	756
4	1000
5	1260
6	1512
7	1764
8	2016
9	2268
10	2520

Металлогидридный накопитель водорода VL-25 (рисунок 35). Средняя цена 50000 руб [21]. Нам нужно два накопителя. Поэтому цена составит 100000 руб.



Рисунок 35 – Металлогидридный накопитель водорода VL-25

Технические характеристики генератора приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Технические характеристики металлгидридного накопителя

Объем, л	25
Давление , атм	5
Длина, мм	147
Масса, гр	307

Остальные части установки такие же как в предыдущей системе.

Далее в таблицы 27 приведены затраты на автономную гибридную установку энергообеспечения на базе водородной электростанции с АКБ в течении 10 лет эксплуатации.

Таблица 27 – Затраты на систему в течении 10 лет эксплуатации

Год эксплуатации	Цена владения, рубли
1	810 252
2	810 504
3	810 756
4	811 000
5	811 260
6	811 512
7	811 764
8	812 016
9	812 268
10	812 520



В итоге, за год эксплуатации водородной системой обойдется в 810 252 руб.

Цена владения установкой за 10 лет составит 812 520рублей.

1 кВт будет стоить 30,6 рублей

Результаты сравнения стоимости от срока обладания систем резервного энергообеспечения таких как: водородная электростанция, дизельный генератор с буферным АКБ, бензиновый генератор на газовом топливе с буферным АКБ и ветро-солнечная электростанция с АКБ с мощностью 5 кВт, приведены на рисунке 36.

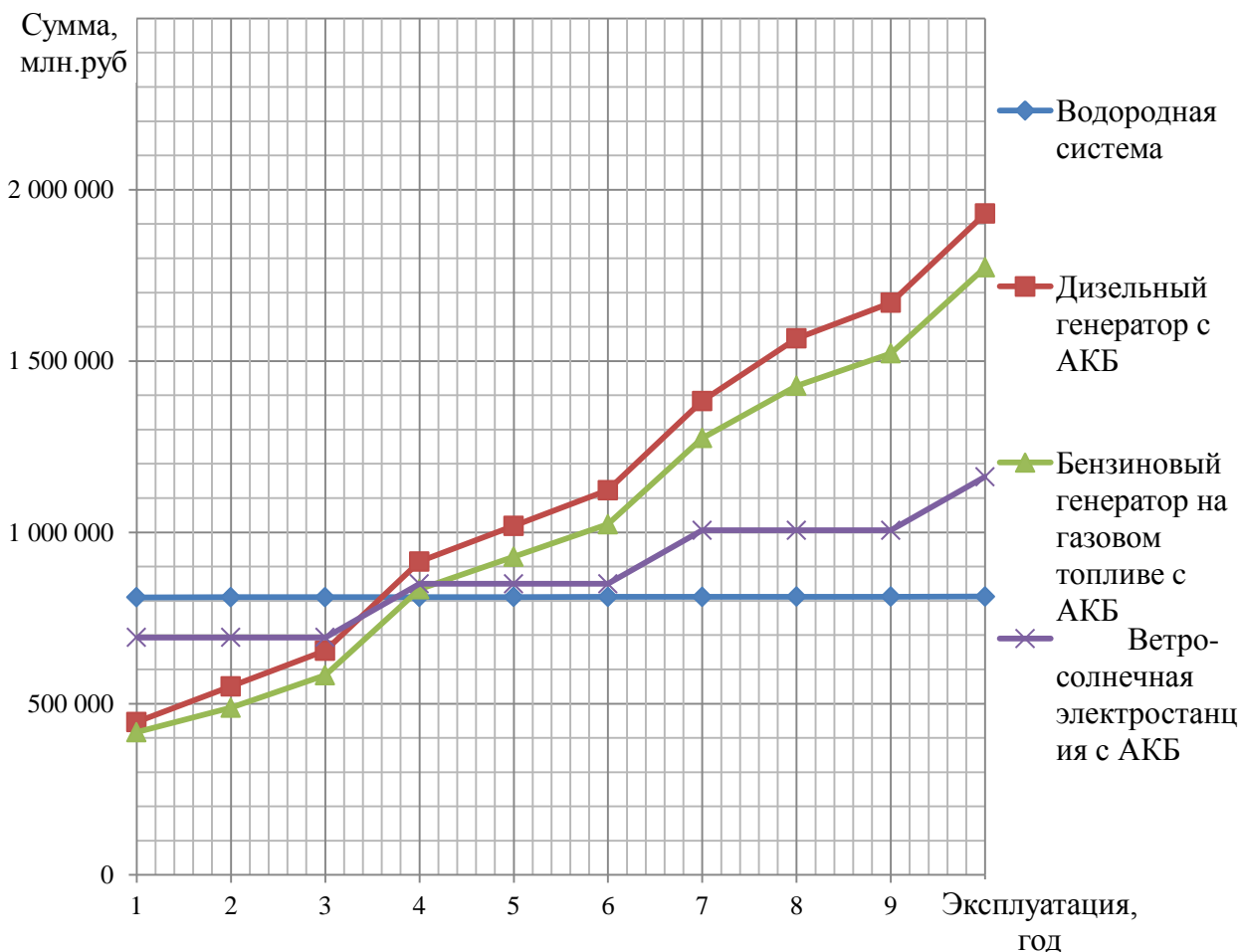


Рисунок 36 – Стоимость мощностью 5 кВт

На график видно, что начальная цена дизельного генератора с буферным АКБ мощностью 5 кВт достигает 500 тыс. руб., а с увеличением срока эксплуатации стоимость обладания увеличивается почти в 4 раза (за 10 лет). У бензинового генератора на газовом топливе с буферным АКБ начальная цена самая низкая по сравнению с другими системами, но за 10 лет цена возрастает почти до 1 800 000 рублей, чуть уступая дизельной системе.

Ветро-солнечная электростанция с АКБ более привлекательно по сравнению с выше перечисленными системами. Но из-за применения АКБ в системе стоимость увеличивается в каждые 3 года на 300 тысяч рублей.

Стартовая цена системы автономной системы энергообеспечения на водороде составляет 810 тыс. руб., но дальнейший рост цены увеличивается всего лишь на 2 000 рублей при сроке эксплуатации 10 лет. К тому же срок службы данной системы свыше 20 лет, что приводит к окупаемости данной системы.

Из графика можно сделать вывод, что использование автономной гибридной системы энергообеспечения на базе ветро-солнечной электростанции с АКБ и водородной системы имеет более низкую стоимость на протяжении 10 лет.

Выводы:

- автономная система энергообеспечения на базе водородной системы можно считать современным решением, поскольку соответствует актуальным мировым трендам в сфере систем электроснабжения.
- внедрение водородной системы на топливных элементах осуществит экологически чистые решения для систем резервного электроснабжения.
- по функциональным характеристикам СРЭ на топливных элементах значительно превосходят существующие системы, что подтверждено в реализованных проектах во всем мире.
- по стоимостным показателям для усредненных (типовых) исходных данных системы резервного питания на ТЭ начальная стоимость незначительно выше по стоимости владения на (10 – 30) % по сравнению с существующими СРЭ;

на расчетном горизонте (20) лет общая стоимость владения меньше стоимости существующих систем.

– водород является чистым источником энергии. К тому же энергия необходимая для создания водорода требуется меньше, чем можно вывести из него.

– снижение зависимости от ископаемых и ядерных источников энергии освободит страну от дорогостоящего иностранного участия и улучшения здоровья и благосостояния его граждан. Это будет достигнуто за счет значительного сокращения выбросов парниковых газов и количества других ядов, относящихся к ископаемым и ядерным источникам энергии в воздухе, земле и воде.

– солнечная энергия может служить источником питания электролизера для получения водорода. Водород будет храниться в накопителях для запуска ТЭ, когда солнечной энергии будет не хватать для обеспечения электричеством потребителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работ были сделаны следующие основные выводы:

1 Проведен анализ децентрализованной энергетики России, основу которой составляют дизельные электростанции. Выявлены негативные факторы (влияющие на надежность автономного электроснабжения), такие как:

– высокий уровень шума, большой объем выхлопных газов, негативно влияющих на окружающую среду.

– проектная мощность ДГУ значительно превышает номинальную мощность оборудования, т.к. необходимо обеспечить и заряд АКБ, и питание оборудования;

– дизельные электростанции нуждаются в проведении регулярных профилактических работ;

– для старта ДГУ необходим свой собственный аккумулятор со всеми проблемами, сопутствующими режиму эксплуатации АКБ с длительными перерывами.

2 Проанализированы варианты построения гибридных автономных систем электроснабжения мощностью до 5 кВт, определена перспективная структурная схема построения водородной системы автономного электроснабжения.

3 Проведенный анализ разновидностей возобновляемых источников энергии показал высокую эффективность и целесообразность использования комбинированной системы ВСЭС и ВСЭ в автономных системах энергоснабжения; неравномерность поступления солнечной энергии диктует необходимость использования дополнительных резервных источников, такая как водородная система.

4 Проведенный функционально-стоимостной анализ автономных систем, позволил установить необходимое число элементов энергосистемы для устойчивого и бесперебойного энергоснабжения потребителя.

В состав автономной гибридной установки энергообеспечения на базе водородной электростанции входит:

- один генератор водорода;
- один модуль на топливных элементах;
- один инвертор (преобразователь напряжения в ~220Вольт);
- один аккумулятор;
- два металлгидридных накопителя.

5 Установлено, что разработанная автономная система энергоснабжения на базе водородной системы экономически целесообразна при отсутствии возможности подключения к централизованной системе энергоснабжения, суммарная стоимость основных затратных элементов ВСЭС, согласно расчетам настоящего времени, составила 817 тыс. рублей, при расчетном сроке службы более 20 лет.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hassan Moghbelli , Abolfazl Halvaei Niasar. Conversion of Gasoline Vehicles to CNG Hybrid Vehicles (CNG-Electric Vehicles) [Text] / Hassan Moghbelli etc. – Science: vol. 6(13), 2013. – p.p. 2332-2338, количество знаков с пробелами(8050),источник(<https://doaj.org/article/1f6f85ec4f304bd6bdae196e419d880f>)
2. Habib Ullah, M., T.S. Gunawan, Sharif M. Raihan and Riza Muhida. Development of a electrically inspired low emission microcontroller based hybrid vehicle [Text] / Habib Ullah etc. – Science: vol. 9 (10), 2012. – p.p. 1729-1735, количество знаков с пробелами (8316), источник ( <https://doaj.org/article/20d6558dce8643f9b996a57eda4127da>)
3. G. Adinarayana, Ch. Ashok Kumar, M. Ramakrishna. Fabrication of hybrid petroelectric vehicle [Text] / G. Adinarayana etc. – Science: Vol. 4, Issue 10( Part - 6), October 2014, pp.142-144, количество знаков с пробелами (8009), источник(<https://doaj.org/article/f179d955dc9b4686b6e5e9d3978e7049>)
4. Nereida Carrión, Miguel Murillo, Héctor Rodríguez, José Chirinos and Dorfe Díaz. Study of the fundamental plasma parameters by HG ICP-OES with a dual hydride generation system [Text] / Nereida Carrión etc. – Science: vol. 6(3), 2011. – p.p. 61-68, количество знаков с пробелами (8054), источник (<https://doaj.org/article/216d943f80d34f2381044dfe2df1a582> )
5. W. Bendaikha, S. Larbi, B. Mahmah and M. Belhamel. Experimental study of the production of solar hydrogen in Algeria. [Text] / W. Bendaikha etc. – Science: vol. 2(1), 2010. – p.p. 192-202, количество знаков с пробелами (8013), источник (<https://doaj.org/article/241079bfee4d4d7c82c5ff76875a5afa> )
6. Amal Nassar, Eman Nassar. The design of a low-cost device for the production of hydrogen [Text] / Amal Nassar etc. – Science: vol. 13(25), 2014. – p.p. 158-165, количество знаков с пробелами (8024), источник (<https://doaj.org/article/477e5fd34e2a4cd382b704b5b5278e6c> )

7. O. V. Marchenko and S. V. Solomin. Economic Efficiency Assessment of Autonomous Wind/Diesel/Hydrogen Systems in Russia [Text] / O. V. Marchenko etc. – Science: vol. 8(4), 2013. – p.p. 2314-2317, количество знаков с пробелами (8060), источник (<https://doaj.org/article/a2a185adb8ac49bdb6ffaf9dd201413> )
8. Morten B. Ley , Mariem Meggouh , Romain Moury , Kateryna Peinecke and Michael Felderhoff. Development of Hydrogen Storage Tank Systems Based on Complex Metal Hydrides [Text] / Morten B. Ley etc. – Science: vol. 8(9) , 2015. – p.p. 5891-5921., количество знаков с пробелами (8030), источник (<https://doaj.org/article/020005618d5b4ebc8fc8b72ec296b2d5> )
9. Scott McWhorter , Kathleen O'Malley , Jesse Adams , Grace Ordaz , Katie Randolph and Ned T. Stetson. Moderate Temperature Dense Phase Hydrogen Storage Materials within the US Department of Energy (DOE) H2 Storage Program: Trends toward Future Development [Text] / Scott McWhorter etc. – Science: vol. 2(1) , 2012. – p.p. 413-445, количество знаков с пробелами (8021), источник (<https://doaj.org/article/7069de51177844f7933c63db6a00ecfe> )
10. Ewa C. E. Rönnebro , Greg Whyatt , Michael Powell , Matthew Westman , Feng (Richard) Zheng 1 and Zhigang Zak Fang. Metal Hydrides for High-Temperature Power Generation [Text] / Ewa C. E. Rönnebro etc. – Science: vol. 8, 2015. – p.p. 8406-8430, количество знаков с пробелами (8010), источник (<https://doaj.org/article/9fd5eac6e4b347e69a4f6536b02848ca>)
11. Сравнение существующих систем резервного электропитания: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forumhouse.ru/entries/639/> (Дата обращения: 18.10.2017).
12. Дизельная электростанция: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа: <https://market.yandex.ru/product--champion-dg6500es/7332208?clid=703> / (Дата обращения: 02.11.2017).
13. Аккумулятор: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа: <http://tok-shop.ru/product/coslight-6-gfm-200s/> (Дата обращения: 13.12.2017).

14. Зарядное устройство: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа:<http://profoborud.ru/products/zaryadnoe-ustroistvo-24v20a>(Дата обращения: 20.12.2017).
15. Гибридный солнечный инвертор: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа:<https://e-solarpower.ru/solar/inverter/hybrid-inv/gibridnyy-solnechnyy-invertor-sila-v-5000m/>(Дата обращения: 19.02.2018).
16. Электростанция бензиновая: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа:[https://www.kubaninstrument.ru/instruments/elektrostantsii\\_generator/benzinovy\\_elektrostantsii/elektrostantsiya\\_benzinovaya\\_kipor\\_kge\\_6500e/?\\_openstat=bWFya2V0LnIhbmRleC5ydTlVQrdC70LXQutGC0YDQvtGB0YLQsNC90YbQuNGPINcx0LXQvdC30LjQvdC-0LLQsNGPIEtJUE9SIEtHRSA2NTAwRTt6WEpkTVpGa0lhaUVWTEVRZ0FhMElnOw&frommarket=https%3A//market.yandex.ru/product/7348967/offers%3Ftrack%3D&ymclid=141150731445714588200003](https://www.kubaninstrument.ru/instruments/elektrostantsii_generator/benzinovy_elektrostantsii/elektrostantsiya_benzinovaya_kipor_kge_6500e/?_openstat=bWFya2V0LnIhbmRleC5ydTlVQrdC70LXQutGC0YDQvtGB0YLQsNC90YbQuNGPINcx0LXQvdC30LjQvdC-0LLQsNGPIEtJUE9SIEtHRSA2NTAwRTt6WEpkTVpGa0lhaUVWTEVRZ0FhMElnOw&frommarket=https%3A//market.yandex.ru/product/7348967/offers%3Ftrack%3D&ymclid=141150731445714588200003)(Дата обращения: 05.02.2018).
17. Солнечная батарея:[Электронный ресурс]. URL:– Режим доступа:<https://e-solarpower.ru/solar/solar-panels/mono-panel/solnechnaya-panel-silasolar-300vt/>(Дата обращения: 01.03.2018).
18. Ветрогенераторы:[Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа:<http://energy-ds.ru/catalog/generating/vetrogenerator/vetrogenerator-condor-home-05-5kvt/condor-home-3-kvt.html>(Дата обращения: 25.03.2018).
19. Топливный элемент: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа:<https://www.recycledgoods.com/dantherm-dbx5000-4000710-5kw-hydrogen-fuel-cell-battery-extender-generator-as-is/>(Дата обращения: 06.03.2018).
20. Генератор водорода:[Электронный ресурс]. URL:<https://tiu.ru/p38051475-generator-vodoroda-tsvethrom.html>(Дата обращения: 18.02.2017).
- 21.Накопитель водорода: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа:<http://www.fuelcellstore.com/bl-20-metal-hydride>(Дата обращения: 23.04.2018).
22. Haoxiong Nan, Xinlong Tian, Lijun Yang. A Platinum Monolayer Core-Shell Catalyst with a Ternary Alloy Nanoparticle Core and Enhanced Stability for the



- Oxygen Reduction Reaction [Text] / Haoxiong Nan, Xinlong Tian etc. – Science: vol. 9, 2015. – p.p. 8401-8432, количество знаков с пробелами (8020), источник (<https://doaj.org/article/00607afc920745d6895a9b5db88b414d>)
23. Чурилов Г. Н., Осипова И. В. Новые направления наноматериаловедения [Электронный ресурс] / Чурилов Г. Н. // Учебно-методическое пособие. – 2013. – Режим доступа: <http://kirensky.ru/zdoc/newnano.pdf> . – (Дата обращения: 17.04.2018).
24. Тарасов Б.П., Фурсиков П.В. Разработка и создание водородной системы [Электронный ресурс] / Тарасов Б.П // Отчет о научных исследованиях. – 2014. – Режим доступа: [http://www.icp.ac.ru/media-store/FILES/Shirshova/Dokumenty/FTSP/14.604.21\\_otchet\\_1etap.pdf](http://www.icp.ac.ru/media-store/FILES/Shirshova/Dokumenty/FTSP/14.604.21_otchet_1etap.pdf). – (Дата обращения: 11.04.2018).
25. Топливный элемент: [Электронный ресурс]. URL: – Режим доступа: <http://eef.misis.ru/sites/default/files/lectures/6-6-4,5.pdf> // (Дата обращения: 13.05.2018).
26. Aqsa Yousaf, Muhammad Nawaz Tahir , Abdul Rauf, Shafique Ahmad Awan, Saeed Ahmad Crystal structure of catena-poly[Text] / Aqsa Yousaf etc. – Science: vol. 71(3), 2015. – p.p. 2056-9890 ,количество знаков с пробелами (6034), источник (<https://doaj.org/article/000e355fb0824f98922f2f7eb9e5b7a7> )
27. Moumita Dutta, Utpal Kumar Biswas, Runu Chakraborty, Piyasa Banerjee, Utpal Raychaudhuri, Arun Kumar. Evaluation of plasma H<sub>2</sub>S levels and H<sub>2</sub>S synthesis in streptozotocin induced Type-2 diabetes-an experimental study based on Swietenia macrophylla seeds[Text] / Moumita Dutta etc. – Science: vol. 4(S1), 2014. – p.p. 2221-1691, количество знаков с пробелами (9032), источник (<https://doaj.org/article/002c66e9e3f04955b6152279de7a21ad>)
28. T. Niewierowicz, E. Campero, R. Escarela, I. López–García. Parameter Sensitivity of High–Order Equivalent Circuit Models Of Turbine Generator [Text] T. Niewierowicz etc. – Science: vol. 11(11), 2010. – p.p. 101-111, количество знаков с пробелами (7011), источник (<https://doaj.org/article/153923499a09492aa93cbe46e6e4206f>)

29. Bormann R., Jaramillo–Vigueras D., Klassen T., Martínez–Franco E. Hydrogen Sorption Properties of the Intermetallic Mg<sub>2</sub>Ni Obtained by Using a Simoloyer Ball Milling [Text] Bormann R etc. – Science: vol. 11(3), 2010. – p.p. 325-332, количество знаков с пробелами (8213), источник (<https://doaj.org/article/248999a092b74f29a1d30d2c143a6f63>)
30. Angeles-Camacho C., Bañuelos-Ruedas F. Incorporation of a Wind Generator Model into a Dynamic Power Flow Analysis [Text] Angeles-Camacho C. etc. – Science: vol. 12(3), 2011. – p.p. 311-320, количество знаков с пробелами (6113), источник (<https://doaj.org/article/06ef30275fde47d58f7e19c215da98c5>)