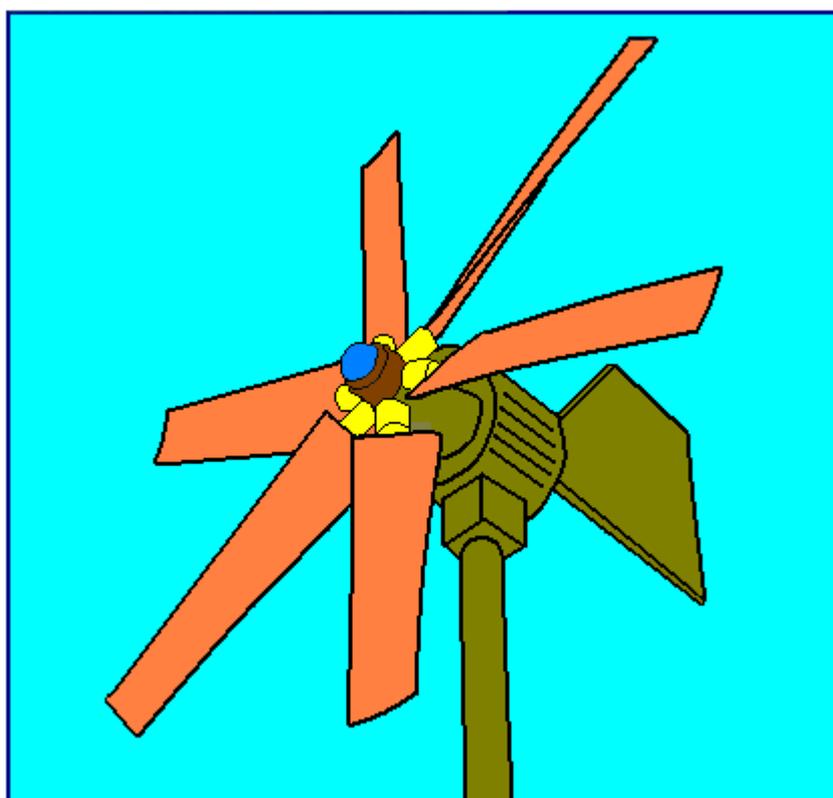


Министерство Высшего и среднего специального образования  
Республики Узбекистан  
Национальный Университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека

**С.И. Власов, Д.А. Толипов**

## **Нетрадиционные источники энергии**



Ташкент  
«Университет»  
2013

Данный пособие является кратким обзором современного состояния энергоресурсов человечества. Приведен анализ существующих видов источников энергии, их эволюции и рассмотрены возможные перспективы развития. Приведен анализ некоторых проблем освоения новых источников энергии (альтернативные или не традиционные источники энергии). Цель настоящего курса лекций: ознакомление с современным положением дел в этой широкой области, ориентация обучающихся на поиск новых путей получения новых форм энергии.

Учитывая различную подготовку студентов, а так же возможность самостоятельного изучения отдельных разделов, в конспекте приведены достаточно подробные описания физических основ различных методов получения энергии. Приведены сравнительные характеристики, показаны достоинства и недостатки каждого из рассматриваемых методов. Для более наглядного представления показан внешний вид большинства существующих и проектируемых энергетических установок.

Пособие составлен на основе опыта организации лекционных занятий на кафедре «Физика полупроводников и полимеров» Национального Университета Узбекистана и предназначен для студентов, обучающихся в магистратуре по специальностям «Физика конденсированных сред», «Гелиофизика и использование солнечной энергии»

Рецензенты: Б.Ю.Соколов, доктор физико-математических наук.

А.В. Каримов, доктор физико-математических наук, профессор.

Рекомендовано к изданию научно - методическим советом  
Национального Университета Узбекистана им. Мирзо Улугбека.

(протокол № 1 от 05. 09. 2012 г.)

## Лекция 1.

### Введение.

Энергия – греческое слово, означающее в переводе деятельность. В настоящее время энергия – одно из чаще всего обсуждаемых понятий, т.к. помимо своего основного физического содержания, оно имеет экономические, технические, политические и экологические аспекты.

Человечеству нужна энергия, причем потребности в ней увеличиваются с каждым годом. Вместе с тем запасы традиционных природных топлив (нефти, угля, газа и др.) конечны. По оценкам специалистов, мировые ресурсы угля составляют 15, а по неофициальным данным – 30 триллионов тонн, нефти – 300 миллиардов тонн, газа – 220 триллионов кубометров. Разведанные запасы угля составляют 1685 миллиардов тонн, нефти – 137 миллиардов тонн, газа – 142 триллионов кубометров.

Существует точка зрения, что при нынешнем уровне потребления энергии запасов угля хватит примерно на 270 лет, нефти на 35-40 лет, газа на 50 лет. Не бесконечны также и запасы ядерного топлива – урана и тория, из которого можно получать плутоний, необходимый для работы атомных станций. Практически неисчерпаемы запасы термоядерного топлива – водорода, однако управляемые термоядерные реакции пока не освоены и неизвестно, когда они будут использованы для промышленного получения энергии в чистом виде, т.е. без участия в этом процессе реакторов деления. Остаются два пути: экономия при расходовании энергоресурсов и использование новых, нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Данный курс лекций является кратким обзором современного состояния энергоресурсов человечества. Анализ существующих видов источников энергии их эволюция, а также проблемы освоения и использования новых ресурсов энергии (альтернативные или не традиционных источники энергии). Цель курса лекций: ознакомление с современным положением дел в этой широкой области, поиск новых путей получения практически полезных форм энергии.

К не традиционным источникам энергии, которые мы будем рассматривать на лекциях, в первую очередь относятся: солнечная и геотермальная энергия, приливная, атомная, энергия ветра и энергия волн. В отличие от ископаемых топлив эти формы энергии не ограничены геологически накопленными запасами (если атомную энергию рассматривать вместе с термоядерной). Это означает, что их использование и потребление не ведет к неизбежному исчерпанию запасов.

Проблемы, связанные с происхождением, экономичностью, техническим освоением и способами использования различных источников энергии, были и будут неотъемлемой частью жизни на нашей планете. Прямо или косвенно с ними сталкивается каждый житель Земли. Понимание принципов производства и потребления энергии составляет

необходимую предпосылку для успешного решения приобретающих все большую остроту проблем современности и в еще большей степени - ближайшего будущего.

Если в конце позапрошлого века самая распространенная сейчас энергия - электрическая - играла, в общем, вспомогательную и незначительную роль в мировом балансе, то уже в 1930 году в мире было произведено около 300 миллиардов киловатт-часов электроэнергии. В 2000 году было произведено 40 тысяч миллиардов киловатт-часов. И все равно энергии не достаточно, а потребности в ней растут.

Уровень материальной, а в конечном счете, и духовной культуры людей находится в прямой зависимости от количества энергии, имеющейся в их распоряжении. Чтобы добыть руду, выплавить из нее металл, построить дом, сделать любую вещь, нужно израсходовать энергию. А потребности человека все время растут, да и людей становится все больше.

Рождение энергетики произошло несколько миллионов лет тому назад, когда люди научились использовать огонь. Огонь давал им тепло и свет, был источником вдохновения и оптимизма, оружием против врагов и диких зверей, лечебным средством, помощником в земледелии, консервантом продуктов, технологическим средством и т.д.

На протяжении многих лет огонь поддерживался путем сжигания растительных энергоносителей (древесины, кустарников, камыша, травы, сухих водорослей и т.п.), а затем была обнаружена возможность использовать для поддержания огня ископаемые вещества: каменный уголь, нефть, сланцы, торф.

Сейчас известно, что древесина - это аккумулированная с помощью фотосинтеза солнечная энергия. При сгорании каждого килограмма сухой древесины выделяется около 20 000 кДж тепла. Как вы знаете эта величина называется теплотой сгорания. Напомним также, что теплота сгорания бурого угля равна примерно 13000 кДж/кг, антрацита 25000 кДж/кг, нефти и нефтепродуктов 42000 кДж/кг, а природного газа 45000 кДж/кг. Самой высокой теплотой сгорания обладает водород - 120000 кДж/кг.

В физике термином "энергия" обозначают единую меру различных форм движения материи. Энергию можно получить при сгорании 1 кг угля или 1 кг нефти, которые называются энергоносителями. Законы физики утверждают: та работа, которую можно получить в реальных машинах и использовать на наши нужды, будет всегда меньше энергии, заключенной в энергоносителе. Энергия - это, по сути дела, энергетический потенциал (или просто потенциал), а работа - это та часть потенциала, которая дает полезный эффект. Разницу между энергией и работой называют диссипированной (или рассеявшейся) энергией. Таким образом, работа совершается в процессе преобразования одних видов энергии в другие и характеризует полезную ее часть, полученную в процессе такого преобразования. Рассеянная в процессе совершения работы энергия неизменно превращается в тепло, которое сообщается окружающему

пространству. Поскольку процессы преобразования одних видов энергии в другие бесконечны, любая работа, в конце концов, переходит в тепло, т.е. обесценивается. Это означает, что чем больше человечество добывает угля, нефти и других энергоресурсов, тем больше оно в конечном итоге нагревает окружающую среду. С этой точки зрения важной причиной необходимости освоения альтернативных источников энергии является проблема глобального потепления. Суть ее заключается в том, что двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ), высвобождаемая при сжигании угля, нефти и бензина в процессе получения тепла, электроэнергии и обеспечения работы транспортных средств, поглощает тепловое излучение поверхности нашей планеты, нагретой Солнцем и создает так называемый парниковый эффект.

Прогноз роста потребности в энергии чаще всего связывают с ростом численности населения Земли. При этом предполагают, что на каждого жителя уровень полученной энергии будет также увеличиваться. 15 июля 1987 года численность населения Земли перешла 5-миллиардный рубеж (прогнозы 1975 года утверждали, что это произойдет только после 1990 года!). В 2000 году население составляло более 6 млрд. человек, а на каждого жителя приходилось в год в среднем около 29 МВт·ч получаемой энергии, в то время как общая годовая потребность в ней составляла 20-200 млрд. МВт·ч.

В настоящее время выдвигаются множество различных идей и предложений по использованию всевозможных возобновляемых видов энергии. Разработка некоторых проектов еще только начинается. Так, выдвигались предложения по использованию энергии разложения атомных частиц, искусственных смерчей, энергии молнии и даже гравитации. В данном курсе лекций мы рассмотрим наиболее перспективные “нетрадиционные” источники энергии.

### **Контрольные вопросы**

Какие аспекты имеет понятие «энергия»?

Чем вызвана необходимость поиска новых источников энергии?

Чем возобновляемые источники энергии отличаются от невозобновляемых?

Какие виды энергии относятся к не традиционным источникам энергии?

Как существующие источники энергии воздействуют на окружающую среду?

## Лекция 2. Гидроэнергетика.

Многие тысячелетия служит человеку энергия, заключенная в текущей воде. Запасы ее на Земле колоссальны. Недаром некоторые ученые считают, что нашу планету правильнее было бы называть не Земля, а Вода - ведь около трех четвертей поверхности планеты покрыты водой. Огромным аккумулятором энергии служит Мировой океан, поглощающий большую ее часть, поступающую от Солнца. Здесь плещут волны, происходят приливы и отливы, возникают могучие океанские течения. Рождаются могучие реки, несущие огромные массы воды в моря и океаны. Понятно, что человечество в поисках энергии не могло пройти мимо столь гигантских ее запасов. Однако, раньше всего люди научились использовать энергию рек.

Свыше 2000 лет назад в горных районах Ближнего Востока уже пользовались водяным колесом в виде вала с лопатками, погруженного в поток воды. Устройство такого колеса показано на рисунке 1.2. Принцип работы этого устройства следующий. Поток воды, отведенный из ручья или речки, давит на лопатки, передавая им свою кинетическую энергию.

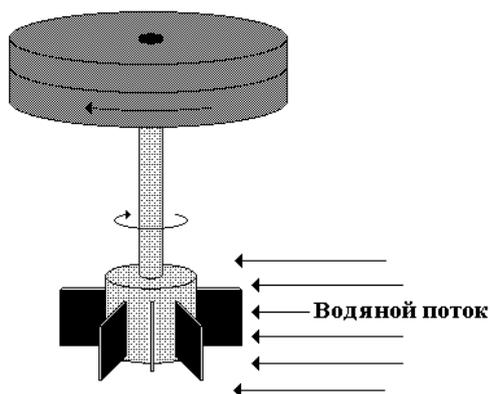


Рис. 1.2. Первые водяные колеса.

Лопатки приходят во вращательное движение вал, с которым скреплен мельничный жернов, который вместе с валом вращается. Именно так работали первые «механизированные» мельницы для зерна. Но их сооружали только в горных районах, где есть речки и ручьи с большим перепадом и сильным напором. На медленно текущих потоках водяные колеса с горизонтально размещенными лопатками малоэффективны. Шагом

вперед было водяное колесо Витрувия (1 в. н. э.), схема которого показана на рисунке 2.2. Это вертикальное колесо с большими лопатками и горизонтальным валом. Вал колеса связан при помощи деревянных зубчатых колес, с вертикально установленным валом, к которому прикреплен мельничный жернов. Подобные мельницы и сегодня можно встретить в ряде стран.

Устройства, в которых энергия воды используется для совершения работы, принято называть водяными (или гидравлическими) двигателями. Простейшие и самые древние из них – описанные выше водяные колеса.

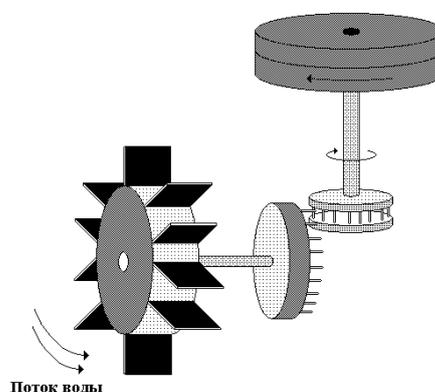
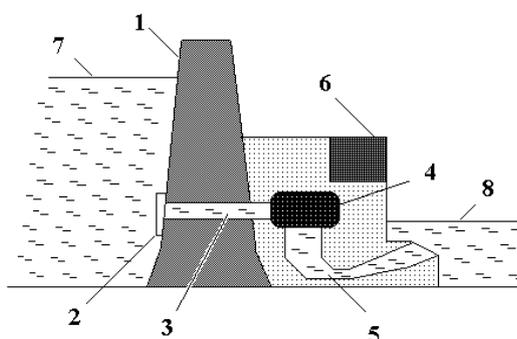


Рис. 2.2. Колесо Витрувия

Различают колеса с верхним, средним и нижним подводом воды. Водяное колесо, показанное на рисунке 2.2, работает при помощи нижнего подвода воды.

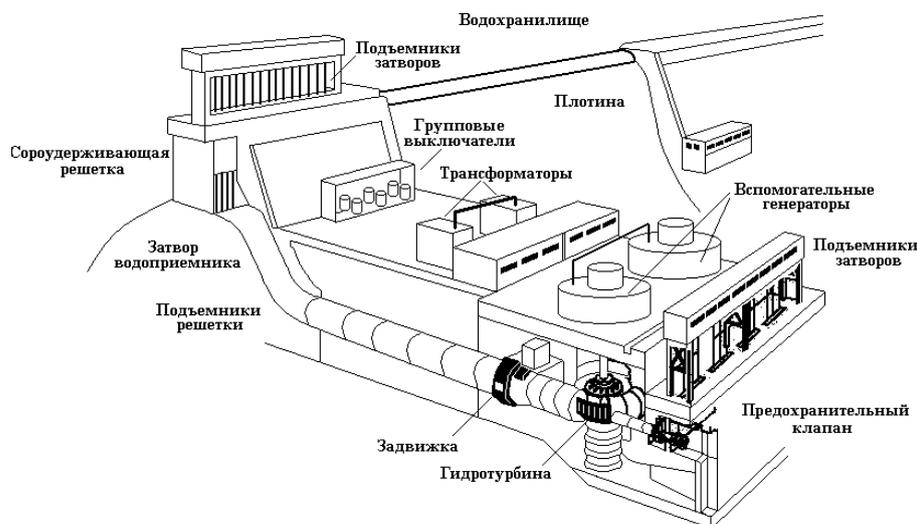
В современной гидроэлектростанции масса воды с большой скоростью устремляется на лопадки турбин. Вода из плотины течет через защитную сетку и регулируемый затвор – по стальному трубопроводу к турбине, над которой установлен генератор. Механическая энергия воды посредством турбины передается генераторам и в них преобразуется в электрическую энергию. После совершения работы вода стекает в реку через постепенно расширяющийся туннель, теряя при этом свою скорость. Схема такой гидроэлектростанции показана на рисунке 3.2. На этом рисунке: 1– плотина; 2 – защитная сетка; 3 – стальной трубопровод; 4 – турбина с генератором; 5 – расширяющийся туннель отводящий воду; 6 – трансформатор; 7,8 – верхний и нижний уровни воды.



**Рис. 3.2. Упрощенная схема гидроэлектростанции**

Современные гидроэлектростанции классифицируются по мощности на следующие типы: мелкие (с установленной электрической мощностью до 0,2МВт), малые (до 2 МВт), средние (до 20 МВт) и крупные (свыше 20 МВт). Вторым критерием, по которому разделяются гидроэлектростанции – напор воды. Различают низконапорные ГЭС (напор до 10 м), среднего напора (до 100 м) и высоконапорные (свыше 100 м). В редких случаях плотины высоконапорных ГЭС достигают высоты 240 м. Такие плотины сосредоточивают перед турбинами водную энергию, накапливая воду и поднимая ее уровень. Следует отметить, что постройка плотины крупной гидроэлектростанции является очень сложной технической задачей. Это обусловлено тем, что для строительства современной гидроэлектростанции необходимо мощной плотиной перегородить реку и построить целый комплекс сложных инженерных сооружений. В качестве примера, рассмотрим Чарвакскую гидроэлектростанцию – одну из крупных гидроэлектростанций Средней Азии. Мощность Чарвакской ГЭС- 600 МВт. Станция имеет четыре гидроагрегата по 150 МВт каждый. Диаметр рабочих колёс гидротурбин - 4,4 м, частота вращения – 187,5 об/мин. Плотина этой станции имеет высоту

168 метров, длину – 770 м. Объем насыпи 18,8 млн.м<sup>3</sup>. Полный объем водохранилища – 2006 млн.куб.м. Чарвакская станция имеет большое



**Рис. 4.2. Упрощенная схема устройства современной гидроэлектростанции**

комплексное значение для развития народного хозяйства Узбекистана и, прежде всего, для орошения плодородных земель. На рисунке 4.2. в упрощенном виде показано устройство современной гидроэлектрической станции. Все затраты, на строительство ГЭС велики, но они компенсируются тем, что не приходится платить (во всяком случае, в явной форме) за источник энергии – воду. Мощность современных ГЭС, спроектированных на высоком инженерном уровне, превышает 100 МВт, а К.П.Д. составляет 95% (водяные колеса имеют К.П.Д. 50-85%). Но пока в полной мере, используется лишь небольшая часть гидроэнергетического потенциала земли. Ежегодно огромные потоки воды, образовавшиеся от дождей и таяния снегов, стекают в моря и океаны, оставаясь неиспользованными. Если бы удалось задержать их с помощью плотин, человечество получило бы дополнительно колоссальное количество энергии.

В последнее время усилия инженеров многих стран направлены на снижение стоимости гидроэлектростанций. В этом направлении интересно отметить использование малых гидроэлектростанций, устанавливаемых на не больших реках. На сегодняшний день использование энергии небольших водотоков с помощью малых гидроэлектростанций представляет одно из наиболее эффективных направлений развития альтернативной энергетики. Это обусловлено следующими причинами. При использовании малых гидроэлектростанций не возникают проблем свойственных крупной гидроэлектростанции, а именно отсутствует необходимость строительства сложных и дорогостоящих плотин, гидросооружений и затопление местности. Мини гидроэлектростанции можно устанавливать на не больших

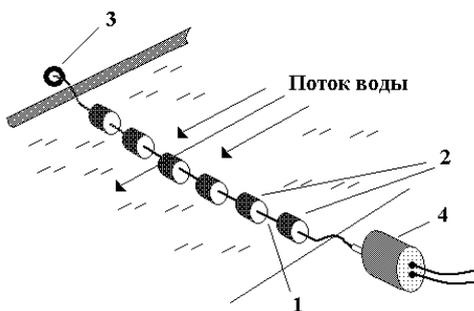
реках и ручьях, использовать естественные перепады высот на озерных водосбросах, расположенных вблизи мест непосредственного потребления электроэнергии.

В качестве примера, на рисунке 5.2. показано устройство мини гидроэлектростанции – водяное колесо. Как видно из рисунка это колесо с лопастями, установленное перпендикулярно поверхности воды. Колесо погружено в поток воды меньше чем наполовину. Вода, воздействуя на лопасти, вращает колесо. Вращение передается на электрический генератор, который преобразует механическую энергию вращательного движения в постоянное или в переменное электрическое напряжение.

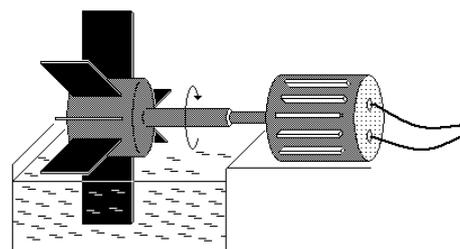
Основное требование к таким устройствам – это достаточно сильный поток воды. Скорость течения воды, для таких мини гидроэлектростанций должна составлять не менее 2-3 метров в секунду. К достоинствам этого типа мини гидроэлектростанций относится их простота и мобильность, к недостаткам относится малая производительность.

В последнее время достаточно широкое распространение получила гирляндная гидроэлектростанция. Гирляндная гидроэлектростанция представляет собой металлический трос с закрепленными на нем роторами. Трос перекинут с одного берега небольшой реки на другой. Роторы полностью погружены в воду. Поток воды вращает роторы, вращение роторов передается тросом. Один конец троса соединен с подшипником, второй коней троса передает вращение валу генератора.

На рисунке 6.2. показано устройство гирляндной мини гидроэлектростанции. Здесь: 1 – металлический трос; 2 – роторы; 3 – подшипник; 4 – генератор. По сути гирляндная мини электростанция – это небольшая плотина. К недостаткам гирляндной гидроэлектростанции относятся: опасность для окружающих,



**Рис. 6.2. Схема гирляндной мини гидроэлектростанции**



**Рис. 5.2. Устройство мини гидроэлектростанции**

что обусловлено необходимостью перепрограживанию реки и низкий КПД. Существует много и других различных типов мини гидроэлектростанций. В качестве примера можно привести: ротор Дарье, это вертикальный ротор, который вращается за счет разности давлений на его лопастях. Разница давлений создается за счет обтекания жидкостью сложных поверхностей.

Эффект подобен подъемной силе судов на подводных крыльях или подъемной силе крыла самолета. Устройство ротора Дарье показано на рисунке 7.2. Основное достоинство минигидроэлектростанции на основе ротора Дарье – это ее простота. Пропеллерная мини-гидроэлектростанция - это подводное колесо с вертикальным ротором, на котором закреплен электрогенератор. Подводный пропеллер может иметь лопасти минимальной ширины. Так ширина лопастей в 2 см оптимальна для скорости потока воды 0,8-2 метра в секунду. При больших скоростях потока воды, оптимальны другие размеры. Промышленность различных стран разработаны пропеллерные энергоблоки переносных гидроэлектростанций мощностью от 0.18 до 30 киловатт. Основным преимуществом таких гидроэлектростанций является также возможность их установки в труднодоступных местах. Основным недостатком таких гидроэлектростанций является низкий КПД.

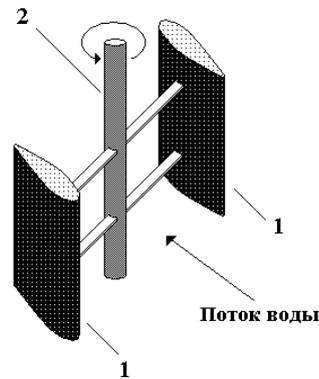


Рис. 7.2. Ротор Дарье

### Контрольные вопросы

- В чем заключается принцип работы современной гидроэлектростанции?
- Как по мощности классифицируются современные ГЭС?
- В чем заключаются достоинства и недостатки крупных ГЭС?
- В чем заключаются достоинства и недостатки малых ГЭС?
- Какие требования предъявляются к мини гидроэлектростанциям?
- Какое устройство называется – ротор Дарье ?
- В чем заключается основное достоинство минигидроэлектростанции на основе ротора Дарье?
- Каково устройство пропелерной мини-гидроэлектростанции?
- В чем заключаются достоинства и недостатки гирляндных гидроэлектростанций?

### Лекция 3. Атомная энергетика

На сегодняшний день значение атомных электростанций в производстве электроэнергии любой страны трудно переоценить. Как было сказано раньше, строительство гидроэнергетических станций требует создания крупных водохранилищ, которые занимают большие площади. Теплоэнергетические станции требуют больших запасов органического топлива (например-угля). Более того, тепловые энергетические установки во всем мире выбрасывают в атмосферу за год до 250 млн. тонн золы и около 60 млн. тонн сернистого ангидрида. Это оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду.

Атомные электростанции (АЭС) – являются намного экономичнее обычных тепловых электростанций, количество радиоактивных веществ, образующихся в период эксплуатации АЭС, сравнительно невелико а, самое главное – это чистые источники энергии.

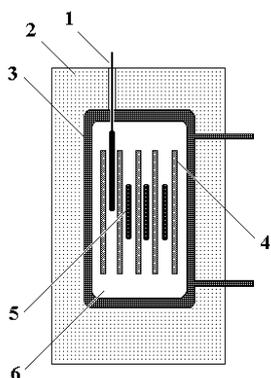
В основе любой атомной электростанции находится ядерный реактор. Ядерный реактор – устройство, в котором происходят ядерные реакции. Ядерные реакции – это реакции превращения одних химических элементов в другие. Для того чтобы такие реакции происходили, необходимо наличие в реакторе делящегося вещества, которое при своем распаде выделяет элементарные частицы, способные вызвать распад других ядер.

В качестве делящегося вещества в настоящее время используются изотопы урана – уран-235 и уран-238, а также плутоний -239. Ядра урана или плутония распадаясь, выделяют энергию, при этом излучаются гамма-кванты и образуются два или три нейтрона, которые, в свою очередь, взаимодействуя с другими атомами, могут, вызвав их деление, продолжить цепную реакцию. Для распада какого-либо атомного ядра необходимо попадание в него элементарной частицы с определенной энергией. Наибольшее значение в ядерной энергетике имеют нейтроны. В зависимости от скорости элементарной частицы может наблюдаться два вида нейтронов: быстрые и медленные. Уран-238 делится только быстрыми нейтронами. При его делении выделяется энергия и образуется 2-3 быстрых нейтрона. Вследствие того, что эти быстрые нейтроны замедляются в веществе урана-238 до скоростей, неспособных вызвать деление ядра урана-238, цепная реакция в уране-238 протекать не может. В уране-235 цепная реакция протекать может, так как наиболее эффективно его деление происходит, когда нейтроны замедлены в 3-4 раза по сравнению с быстрыми, что происходит при достаточно длинном их пробеге в толще урана. в современных ядерных реакторах необходимо для замедления нейтронов применять не сам уран, а другие вещества, мало поглощающие нейтроны например, графит или тяжелая вода. Обыкновенная вода хорошо замедляет нейтроны, но сильно их поглощает. Поэтому для нормального протекания цепной реакции при использовании в качестве замедлителя

обыкновенной легкой воды необходимо использовать уран с высокой долей делящегося изотопа – урана-235 (обогащенный уран). Обогащенный уран производят по достаточно сложной и трудоемкой технологии на горнообогатительных комбинатах, при этом образуются токсичные и радиоактивные отходы. Графит хорошо замедляет нейтроны и плохо их поглощает. Поэтому при использовании графита в качестве замедлителя можно использовать менее обогащенный уран, чем при использовании легкой воды. Другим альтернативным способом решения проблемы замедления нейтронов является создание реактора не требующих их замедления – реактор на быстрых нейтронах. В таком реакторе основным делящимся веществом является не уран, а плутоний. Уран же (используется уран-238) выступает как дополнительный компонент реакции - от быстрого нейтрона, выпущенного при распаде ядра плутония, произойдет распад ядра урана с выделением энергии и испусканием других нейтронов, а при попадании в ядро урана замедлившегося нейтрона он превратится в плутоний-239, возобновляя тем самым запасы ядерного топлива в реакторе. В связи с малой величиной поглощения нейтронов плутонием цепная реакция в сплаве плутония и урана-238 идти будет, причем в ней будет образовываться большое количество нейтронов.

Ядерный реактор. Как уже указывалось, в основе любой атомной электростанции находится ядерный реактор. На сегодняшний день существует несколько различных типов ядерных реакторов. Но обязательными компонентами большинства ядерных реакторов являются являются: тепловыделитель, замедлитель и теплоноситель. Реакторы различаются между собой главным образом по двум признакам: какие вещества используются в качестве замедлителя нейтронов, и какие вещества используются в качестве теплоносителя, с помощью которого производится отвод тепла из активной зоны реактора. Наибольшее распространение имеют водо-водяные реакторы, в которых обычная вода служит и замедлителем нейтронов и теплоносителем. Широко используются, так же уран-графитовые реакторы, в которых замедлителем является графит, а теплоносителем является обычная вода. Можно отметить и газографитовые реакторы, в которых в качестве замедлителя служит графит, а теплоносителем является газ (например, углекислота). Основная характеристика ядерного реактора - его мощность. Мощность в 1 МВт соответствует цепной реакции, в которой происходит  $3 \cdot 10^{16}$  актов деления в 1 секунду.

На рисунке 1.3. представлена принципиальная схема водо-водяного реактора. На этом рисунке: 1– управляющий стержень; 2 – корпус реактора с радиационной защитой; 3– тепловая изоляция; 4– замедлители; 5 – ядерное топливо; 6 – теплоноситель. Из приведенного рисунка видно, что активная зона реактора представляет собой толстостенный сосуд, в котором находятся вода и, погруженные в нее, сборки тепловыделяющих

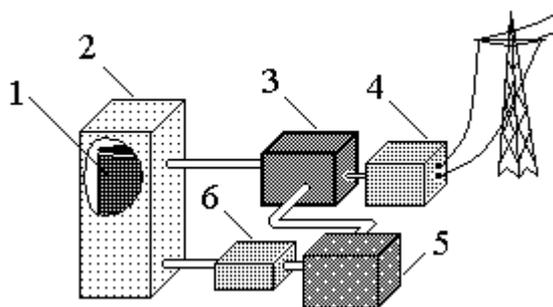


**Рис. 1.3. Схема водо-водяного ядерного реактора**

элементов. Тепло, выделяемое этими элементами, передается воде, температура которой значительно повышается. Нагретая вода (теплоноситель) поступает на турбину, где происходит выработка электроэнергии.

Принципиальная схема тепловой атомной электростанции представлена на рисунке 2.3. На этом рисунке: 1–тепловыделяющий реактор; 2–защитный корпус реактора; 3– турбина; 4– электрогенератор; 5– конденсатор отработанного пара; 6 – насос. Стоит

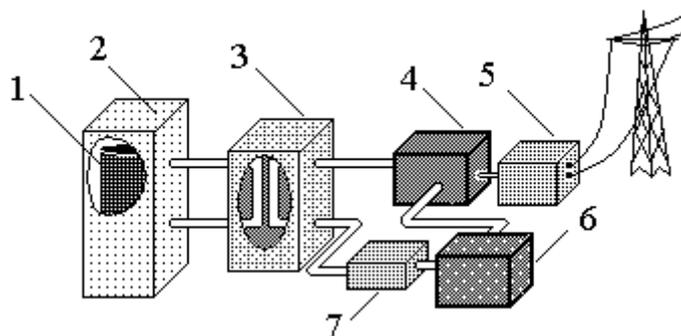
иметь в виду, что в ее конструкции может быть предусмотрено несколько контуров – теплоноситель от тепловыделяющего реактора может не идти сразу на турбину, а отдать свое тепло в теплообменнике теплоносителю следующего контура, который уже может поступать на турбину, а может дальше передавать свою энергию следующему контуру. Схема такой атомной станции показана на рисунке 3.3. Также в любой электростанции предусмотрена система охлаждения отработавшего теплоносителя, чтобы довести температуру теплоносителя до необходимого для повторного цикла значения. Нагретый теплоноситель теплообменника поступает на турбину, где теряет часть своей энергии на выработку электричества. Из турбины теплоноситель поступает в конденсатор для пара, чтобы в реактор поступал теплоноситель с нужными для оптимальной работы параметрами. На рисунке 3.3. показана несколько иная схема построения атомной электростанции. Здесь: 1– реактор с тепловыделяющими элементами; 2– защитный корпус реактора; 3– теплообменник; 4– турбина; 5– электрогенератор; 6–конденсатор отработанного пара; 7– насос. Как видно из рисунка, здесь имеется два контура. Первый, реакторный контур, полностью изолирован от второго, что уменьшает радиоактивные выбросы в атмосферу. Циркуляционные насосы (насос первого контура на схеме не



**Рис. 2.3. Схема одноконтурной атомной электростанции.**

показан) прокачивают воду через реактор и теплообменник. Вода реакторного контура находится под повышенным давлением, так что несмотря на ее высокую температуру (293 градуса – на выходе, 267 – на входе в реактор) ее закипания не происходит. Вода второго контура находится под обычным давлением, так что в теплообменнике она превращается в пар. В теплообменнике теплоноситель, циркулирующий по первому контуру, отдает тепло воде второго контура.

Пар, генерируемый в парогенераторе, по главным паропроводам второго контура поступает на турбины и, отдав часть своей энергии на вращение турбины, после чего поступает в конденсатор. Конденсатор обеспечивает сбор и конденсацию отработавшего пара.



**Рис. 3.3. Схема двухконтурной атомной электростанции**

В 2000 году атомными электростанциями мира производилось 26% всей электроэнергии. Такие электростанции работали в 31 стране и строились еще в 6 странах. Ядерный сектор энергетики наиболее значителен во Франции, Бельгии, Финляндии, Швеции, Болгарии и Швейцарии, т.е. в тех промышленно развитых странах, где недостаточно природных энергоресурсов. Эти страны производят от четверти до половины своей электроэнергии на АЭС. Вместе с тем, нельзя забывать о безопасности эксплуатации этих станций. Всего с момента начала эксплуатации атомных станций в 14 странах мира произошло более 150 инцидентов и аварий различной степени сложности. Наиболее характерные из них: в 1957 г. – в Уиндсейле (Англия), в 1959 г. – в Санта-Сюзанне (США), в 1961 г. – в Айдахо-Фолсе (США), в 1979 г. – на АЭС Три-Майл-Айленд (США), в 1986 г. – на Чернобыльской АЭС, в 2011 – в Японии.

### **Контрольные вопросы**

- К какому виду энергии относится атомная энергия?
- Что находится в основе любой атомной электростанции?
- Что является основной характеристикой ядерного реактора?
- Какие компоненты являются обязательными компонентами большинства ядерных реакторов?

Какие реакции называются ядерными реакциями?  
В чем заключаются основные преимущества и недостатки современных атомных электростанций?  
Как работает реактор на быстрых нейтронах?

#### **Лекция 4. Энергия приливов и отливов.**

Природное явление – периодическое движение морских вод, называемое приливами и отливами, обусловлено силами притяжения Луны. Период повторения приливов и отливов чередуются через 6 ч 12 мин 30 с. Если Луна, Солнце и Земля находятся на одной прямой, Солнце своим притяжением усиливает воздействие Луны, и тогда наступает сильный прилив (большая вода). Когда же Солнце стоит под прямым углом к отрезку Земля-Луна наступает слабый прилив (малая вода). Сильный и слабый приливы чередуются через семь дней.

Самые высокие и сильные приливные волны возникают в мелких и узких заливах или устьях рек, впадающих в моря и океаны. Приливная волна Индийского океана катится против течения Ганга на расстояние 250 км от его устья. Приливная волна Атлантического океана распространяется на 900 км вверх по Амазонке. В закрытых морях, например Черном или Средиземном, возникают малые приливные волны высотой 50-70 см.

Максимально возможная мощность в одном цикле прилив – отлив, т. е. от одного прилива до другого, выражается следующим соотношением:

$$W = \rho g S R^2$$

Здесь:  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $S$  – площадь приливного бассейна,  $R$  – разность уровней воды при приливе и при отливе.

Как видно из приведенного соотношения, для использования приливной энергии наиболее подходящими являются такие места на морском побережье, где приливы имеют большую амплитуду, а контур и рельеф берега позволяют устроить большие замкнутые приливные бассейны. Или другими словами построить приливную гидроэлектростанцию. Приливная электростанция – гидроэлектростанция, использующая энергию приливов. Теоретическая мощность приливных электростанций в таких местах составляет 2-20 МВт.

Электростанции, работающие на энергии прилива, работают по схожему принципу с гидроэлектростанциями, отличие в том, что водяные массы не текут вниз, но движутся туда и обратно с приливами и отливами. В отличие от других форм морской энергии, энергия прилива уже используется в течение достаточно длительного времени.

Первая морская приливная электростанция мощностью 635 кВт была построена в 1913 г. в бухте Ди около Ливерпуля. С 1967 г. в устье реки Ранс во Франции на приливах высотой до 13 метров работает приливная

электростанция ПЭС мощностью 240 тыс. кВт с годовой отдачей 540 тыс. кВтч. В России с 1968 года действует экспериментальная ПЭС в Кислой губе на побережье Баренцева моря. На 2009 год её мощность составляет 1,7 МВт. Приливная электростанция, построенная в устье реки Ранс (Северная Бретань) имеет самую большую в мире плотину, её длина составляет 800 м. Следует отметить, что на сегодняшний день, энергия приливных электростанций обходится дороже энергии тепловых электростанций, но стоимость вырабатываемой ими энергии вполне может быть снижена до стоимости энергии речных электростанций. Поскольку запасы приливной энергии планеты значительно превосходят полную величину гидроэнергии рек, можно полагать, что приливная энергия будет играть заметную роль в дальнейшем прогрессе человеческого общества. Опыт эксплуатации первых в мире приливных электростанций (на реке Ранс во Франции и Кислогубской в России) – показал, что приливные электростанции: устойчиво работают в энергосистемах, как в базе, так и в пике графика нагрузок при гарантированной постоянной месячной выработке электроэнергии; не загрязняют атмосферу вредными выбросами в отличие от тепловых станций; не затопляют земель, в отличие от гидроэлектростанций; не представляют потенциальной опасности в отличие от атомных станций; стоимость электроэнергии, вырабатываемая такими станциями – самая дешевая в энергосистеме (доказано за 35 лет на ПЭС Ранс - Франция). Экологический эффект (на примере Мезенской ПЭС) заключается в предотвращении выброса 17,7 млн. тонн углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в год, что при стоимости компенсации выброса 1 тонны CO<sub>2</sub> в 10 USD (данные Мировой энергетической конференции 1992 г.) может приносить, по расчетам Киотского протокола, ежегодный доход около 1,7 млрд.

В более современных приливных электростанциях двустороннего действия турбины работают при движении воды из моря в бассейн и обратно. Приливные электростанции двустороннего действия способны вырабатывать электроэнергию непрерывно в течение 4-5 ч с перерывами в 1-2 ч четыре раза в сутки. Для увеличения времени работы турбин существуют более сложные схемы – с двумя, тремя и большим количеством бассейнов, однако стоимость таких проектов весьма высока. Однако, не смотря на высокую стоимость приливных электростанций, их строительством занимаются многие страны мира. Недавно Президент Республики Корея официально запустил приливную электростанцию в Сеуле, которая станет крупнейшим в мире сооружением по производству электричества из энергии волн. Приливная электростанция на море Shihwa частично начала функционировать в начале августа 2011 г. В этом году были запущены шесть из десяти ее генераторов. Остальные генераторы, как ожидается, начнут работать в декабре этого же года. После полного запуска в эксплуатацию мощность сеульской электростанции составит 254 МВт. Электроэнергии, которую она будет вырабатывать, будет достаточно для обеспечения города с населением в 500 тыс. человек. С помощью

приливной электростанции Южная Корея будет экономить каждый год более 860 тыс. баррелей нефти и тем самым сможет снизить выбросы углекислого газа на 3,2 млн т в год. В 2014 г. Республика Корея планирует открыть ПЭС мощностью 812 мегаватт.

На юге Великобритании на реке Северн планируется построить большую приливную электростанцию. Река Северн имеет самую большую приливную мощность в мире. Вода в ней может подниматься до 15-18 м, устье наполняется водой 2 раза в день. Такая разница между приливом и отливом есть только на реке Северн и в заливе Фанди в Канаде.

Для приливной станции будет сооружен 16-километровый барьер, разделяющий пролив между южной Англией и южным Уэльсом. 10 турбин диаметром 9 м будут производить 8,6 ГВт электроэнергии. Ожидаемая мощность этой станции будет эквивалента мощности 8 АЭС. Недостаток приливных электростанций в том, что они строятся только на берегу морей и океанов, к тому же они развивают не очень большую мощность, да и приливы бывают всего лишь два раза в сутки. И даже они экологически не безопасны. Они нарушают нормальный обмен соленой и пресной воды и тем самым – условия жизни морской флоры и фауны. Приливные электростанции могут оказать влияние и на климат, поскольку меняют энергетический потенциал морских вод, их скорость и территорию перемещения. К недостаткам приливных электростанций относится так же высокая стоимость строительства и изменяющаяся в течение суток мощность, из-за чего приливная электростанция может работать только в составе энергосистемы, располагающей достаточной мощностью электростанций других типов.

### **Контрольные вопросы**

Какие гидроэлектростанции, называются – приливными электростанциями?

В чем заключается принцип работы приливных гидроэлектростанций?

В чем заключается особенность работы приливных электростанциях двустороннего действия?

В чем заключается основной недостаток приливных электростанций?

В чем заключаются экологические недостатки приливных электростанций?

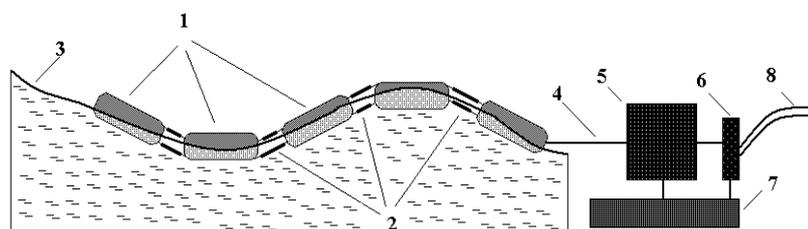
В чем заключаются достоинства приливных электростанций?

Как приливные гидроэлектростанции воздействуют на окружающую среду?

## Лекция 5. Волновые электростанции.

Волновая электростанция - энергетическая установка, расположенная в водной среде, целью которой является получение электричества из кинетической энергии морских или океанических волн. Как и приливные, волновые электростанции располагаются на берегу или океане в непосредственной близости от берега, в целях экономии средств на прокладку подводных электрокоммуникаций.

Первая волновая электростанция расположена в Португалии на расстоянии 5 километров от берега. Эта волновая станция была открыта 23 сентября 2008 года. Мощность данной электростанции составляет 2,25 МВт, этого хватает для обеспечения электроэнергией примерно 1600 небольших домов.



**Рис. 1.5. Устройство волновой электростанции  
Pelamis P-750**

Принципиальная схема волновой электростанции аналогична принципиальной схеме гидроэлектростанции, однако вместо плотины с падающим потоком воды здесь используется гидроволновой преобразователь, преобразующий энергию волн в запасенную в пневмогидроаккумуляторе энергию рабочей жидкости. В качестве примера рассмотрим устройство волновой электростанции Pelamis P-750. Эта волновая электростанция состоит из нескольких устройств, которые представляют собой плавающие объекты – гидроволновые поплавковые преобразователи, соединенные в одну цепь. На рисунке 1.5. показана схема устройства этой волновой электростанции. Здесь: 1 – плавающие поплавковые преобразователи; 2 – гидравлические поршни; 3 – поверхность волны; 4 – гидромагистраль; 5 – главный корпус; 6 – контрольно-распределительное устройство; 7 – аккумуляторное устройство; 8 – отвод к потребителю. Размер каждого гидроволнового поплавкового преобразователя: длина 120 метров, диаметр 3,5 метра, вес 750 тонн. Между преобразователями каждой секции закреплены гидравлические поршни. Внутри каждой секции также есть гидравлические двигатели и электрогенераторы. Под воздействием волн конвертеры качаются на поверхности воды, и это заставляет их изгибаться. Движение каждой секции приводит в работу гидравлические поршни, которые, в свою очередь, приводят в движение масло. Масло проходит через гидравлические

двигатели. Эти гидравлические двигатели приводят в движение электрические генераторы, которые производят электроэнергию. Мощность одного такого конвертера составляет 750 кВт. В электрическую энергию превращается примерно 1% энергии волнения.

Существует много возможностей получения энергии из волн морей и океанов. Среди которых наибольшие распространение получили поглотители колебаний – плавающие на поверхности аттенюаторы и установленные на дне приливные турбины. Одним из интересных решений является энергетический буй – полностью автономное устройство. В этом устройстве используется винтовой компрессор, который крепится якорем ко дну океана и плавает на поверхности. Электроэнергия вырабатывается за счет преобразования поршневой системой и электрогенератором вертикальных перемещений буя на волнах. На берег электричество подается по подводному кабелю.

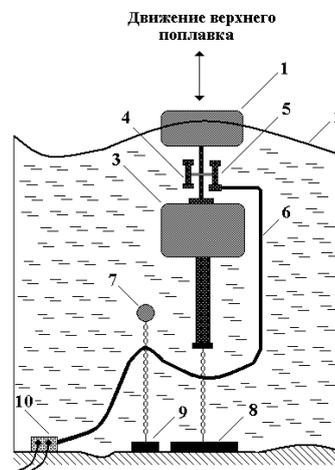
Интересное устройство под названием Searaser разработанное в Англии напоминает волновую электростанцию, использующую энергию вертикального движения поплавка. Однако сам поплавок не имеет электрических систем и представляет обычный механический насос, который закачивает морскую воду на большую высоту в прибрежные скалы. Этот проект получил название – гидроаккумулирующая электростанция. На рисунке 2.5. приведено устройство этой гидроаккумулирующей станции. Здесь: 1 – верхний поплавок; 2 – поверхность волны; 3 – нижний поплавок; 4 – клапан; 5 – поршень; 6 – шланг; 7 – поплавок поддержки шланга; 8, 9 – бетонные якоря; 10 – коллектор. Как видно из приведенного рисунка, основой установки являются 2 поплавка, способных двигаться друг относительно друга. Верхний раскачивается волнами, нижний соединен с дном при помощи цепи и якоря. Между поплавками находится “насосная станция” (цилиндр с поршнем двойного действия, который качает воду при движении вниз и вверх) и клапанами с выходными трубами. Автоматическая подстройка высоты положения верхнего поплавка в зависимости от уровня моря, который меняется в прилив и отлив – телескопическая труба, раздвигающаяся и складывающаяся под действием сил Архимеда и тяжести. К этой “приливной” колонне крепится насос с верхним поплавком. Вода, через коллектор подается на сушу, в горы. В горах устраивается бассейн, в котором вода накапливается и выпускается обратно в море, по пути вращая турбину электростанции, идентичной традиционной ГЭС, но без дамбы. Один полноразмерный поплавок Searaser должен развивать мощность до 0,25 МВт. Основное преимущество у подобной установки, по сравнению с другими, заключается в следующем. В поплавке отсутствуют провода, магниты, какие либо электрические контакты и герметические отсеки для оборудования, что делает его гораздо более дешевым, простым и надежным. Турбины и электрогенераторы волновой станции, расположенные на берегу. В отличие от волновых электростанций, других типов, установка Searaser

решает проблему неравномерности силы волн. В волновых установках с пневматическими преобразователями под действием волн воздушный поток периодически изменяет свое направление на обратное. Для этих условий и разработана турбина Уэллса, ротор которой обладает выпрямляющим действием, сохраняя неизменным направление своего вращения при смене направления воздушного потока, следовательно, поддерживается неизменным и направление вращения генератора.

Турбина нашла широкое применение в различных волноэнергетических установках. Волновая энергетическая установка "Каймей" – самая мощная действующая энергетическая установка с пневматическими преобразователями – построена в Японии в 1976 г. В своей работе она использует волны высотой до 6 - 10 м. На барже длиной 80 м, шириной 12 м и водоизмещением 500 т установлены 22 воздушных камеры, открытые снизу. Каждая пара камер работает на одну турбину Уэллса. Общая мощность установки 1000 кВт. Первые испытания были проведены в 1978 – 1979 гг. близ города Цуруока. Энергия передавалась на берег по подводному кабелю длиной около 3 км.

В 1985 г. в Норвегии в 46 км к северо-западу от города Берген построена промышленная волновая станция, состоящая из двух установок. Первая установка на острове Тофтесталлен работала по пневматическому принципу. Она представляла собой железобетонную камеру, заглубленную в скале; над ней была установлена стальная башня высотой 12,3 м и диаметром 3,6 м. Входящие в камеру волны создавали изменение объема воздуха. Возникающий поток через систему клапанов приводил во вращение турбину и связанный с ней генератор мощностью 500 кВт, годовая выработка составляла 1,2 млн. кВт. ч. Однако сильным штормом в конце 1988 г. башня станции была разрушена.

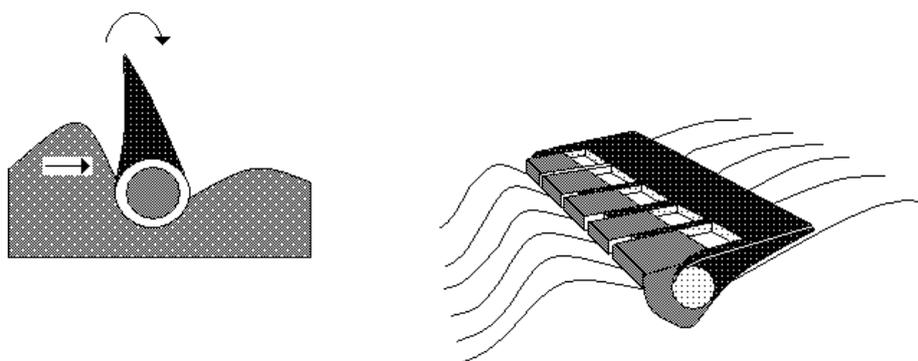
Конструкция второй установки состоит из конусовидного канала в ущелье длиной около 170 м с бетонными стенками высотой 15 м и шириной в основании 55 м, входящего в резервуар между островами, отделенный от моря дамбами, и плотины с энергетической установкой. Волны, проходя по сужающемуся каналу, увеличивают свою высоту с 1,1 до 15 м и вливаются в резервуар, уровень которого на 3 м выше уровня моря. Из резервуара вода проходит через низконапорные гидротурбины мощностью 350 кВт. Станция ежегодно производит до 2 млн. кВт. ч электроэнергии.



**Рис. 2.5.**  
**Гидроаккумулирующая электростанция**

В Великобритании разрабатывается оригинальная конструкция волновой энергетической установки типа "моллюск", в которой в качестве рабочих органов используются мягкие оболочки - камеры. В камерах находится воздух под давлением, несколько большим атмосферного давления. Накатом волн камеры сжимаются, образуется замкнутый воздушный поток из камер в каркас установки и обратно. На пути потока установлены воздушные турбины Уэллса с электрогенераторами. Сейчас создается опытная плавучая установка из 6 камер, укрепленных на каркасе длиной 120 м и высотой 8 м. Ожидаемая мощность 500 кВт. Дальнейшие разработки показали, что наибольший эффект дает расположение камер по кругу. В Шотландии на озере Лох-Несс была испытана установка, состоящая из 12 камер и 8 турбин. Теоретическая мощность такой установки до 1200 кВт.

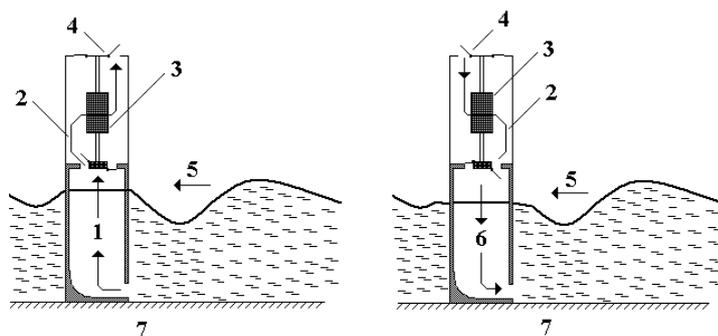
Проект, известный под названием "утка Солтера", представляет собой преобразователь волновой энергии. Рабочей конструкцией является поплавок - "утка", профиль которого рассчитан по законам гидродинамики. Конструкция этого волнового преобразователя энергии показана на рисунке 3.5. В проекте предусматривается монтаж большого количества крупных поплавков, последовательно укрепленных на общем валу. Под действием волн поплавок приходит в движение и возвращается в исходное положение силой собственного веса. При этом приводятся в действие насосы внутри вала, заполненного специально подготовленной водой. Через систему труб различного диаметра создается разность давления, приводящая в движение турбины, установленные между поплавками и поднятые над поверхностью моря. Вырабатываемая электроэнергия передается по подводному кабелю. Для более эффективного распределения нагрузок на валу следует устанавливать 20 – 30 поплавков. В 1978 г. была испытана модель установки, состоявшая из 20-ти поплавков диаметром 1 м. Выработанная мощность составила 10 кВт. Разработан проект более мощной установки из 20 - 30 поплавков диаметром 15 м, укрепленных на валу, длиной 1200 м.



**Рис. 3.5. Преобразователь волновой энергии «утка Солтера»**

Предполагаемая мощность установки 45 тыс. кВт. Подобные системы, установленные у западных берегов Британских островов, могут обеспечить потребности Великобритании в электроэнергии.

В качестве перспективных энергетических установок можно отметить преобразователь, использующий энергию колеблющегося водяного столба. Принцип работы такого преобразователя заключается в следующем. При набегании волны на частично погруженную полость, открытую под водой, столб жидкости в полости колеблется, вызывая изменения давления в газе над жидкостью. Полость связана с атмосферой через турбину. Поток может регулироваться так, чтобы проходить через турбину в одном направлении, или может быть использована турбина Уэлса. Уже известны, по крайней мере, два примера коммерческого использования устройств на этом принципе - сигнальные буи, внедренные в Японии Масудой и в Великобритании сотрудниками Королевского университета Белфаста. Более крупное и впервые включенное в энергосеть устройство построено в Тофтестоллене (Норвегия) фирмой Kvaerner Brug A/S. Основной принцип действия преобразователя, использующего принцип колеблющегося столба показан на рисунке 4.5. На этом рисунке: 1 – волновой подъем уровня; 2 – воздушный поток; 3 – турбина; 4 – система впуска и выпуска воздуха; 5 – направление волны; 6 – опускание волнового уровня; 7 – морское дно.



**Рис. 4.5. Схема установки, в которой используется принцип колеблющегося водного столба**

В Тофтестоллене он используется в 500-киловаттной установке, построенной на краю отвесной скалы. Кроме того, национальная электрическая лаборатория (NEL) Великобритании предлагает конструкцию, устанавливаемую непосредственно на морском дне. Главное преимущество устройств на принципе водяного колеблющегося столба состоит в том, что скорость воздуха перед турбиной может быть значительно увеличена за счет уменьшения проходного сечения канала. Это позволяет сочетать медленное волновое движение с высокочастотным вращением турбины. Кроме того, здесь создается возможность удалить генерирующее устройство из зоны непосредственного воздействия соленой морской воды.

Существуют и другие, менее известные способы преобразования энергии волн в электрическую энергию. Так, волновая электростанция Oceanlinx в акватории города Порт-Кембла (Австралия) использует волны для того, чтобы нагнетать воздух в громадные меха. Сжатый воздух под

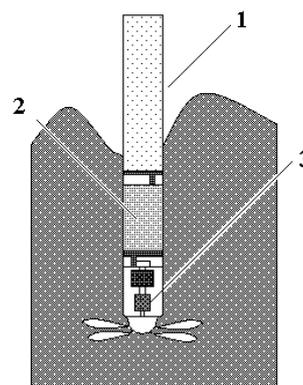
давлением проходит через турбину, вращая ее лопасти. В результате вырабатывается электричество. Установка Oceanlinx в Порт-Кембла поставляет в электросеть города 450 кВт электричества. У побережья США в Орегоне строится «буйковая» электростанция. Буйки под воздействием волн качают магнитный стержень внутри проводящей катушки и генерируют электрический ток.

Электробуйки, разрабатываемые в Орегонском университете, планируется размещать на расстоянии в два-три километра от побережья. По предварительным расчетам, территория в 25 кв. км сможет снабдить электричеством весь штат.

Некоторые типы разработанных и разрабатываемых волновых энергетических установок используют разность отметок гребня и впадины волны. За счет перелива гребней волны, например, через дамбу, или за счет попеременного открытия клапанов или задвижек происходит заполнение емкостей - бассейнов. Образовавшийся перепад уровней в емкости и в море используется водяным колесом или низконапорной гидравлической турбиной для выработки электроэнергии или привода других механизмов. Наиболее известной установкой этого типа является «шлюз Рассела». С целью увеличения действующего перепада уровней (напора) используется эффект набегания волны на отлогую поверхность. Для этого рабочая поверхность устраивается в виде наклонного, суживающегося к верху лотка. Морская волна высотой 1,1 м, собранная по волновому фронту длиной 350 м, при концентрации ее в 12-метровом канале, может привести к возникновению стоячей волны с амплитудой 17 м. Экспериментально установлено, что установка, содержащая наклонную плоскость с углом наклона 30°, обеспечивает поднятие уровня воды на 2,5 м при средней высоте волны 1,5 м. В США разрабатывается установка этого типа под названием «Дэм Атолл». Основным элементом установки является часть сферы диаметром 100 м и высотой до 30 м, выпуклой частью, выступающей над уровнем моря. На поверхности этого искусственного острова расположены волнонаправляющие ребра, а в середине – водоприемное отверстие и водовод диаметром до 18 м с гидротурбиной. Горизонтальное давление набегающих волн может восприниматься и непосредственно различными упругими или подвижными стенками, перемещение которых преобразуется во вращение вала генератора или давление рабочей среды в поршневом насосе. К конструкциям этого типа относится установка «триплейт», предложенная Ф. Фарлеем. Испытания установки в Великобритании в лабораторных условиях при волнах длиной от 1,5 до 7 м, а также в натуральных условиях на крупномасштабной модели при волнах длиной 150 м показали, что расчетный КПД может достигать 80-90% и более.

В настоящее время наиболее распространенными волновыми установками являются поплавковые. Рабочее тело таких установок – поплавок – находится на поверхности моря и совершает вертикальные колебания в соответствии с изменениями уровня воды при ветровом волнении. Вертикальные перемещения поплавка используются для попеременного сжатия газа или жидкости в какой-либо емкости, или они преобразуются во вращательное движение электрического генератора и т.п. Например, буй диаметром 16 м, разработанный в Норвегии, при амплитуде вертикальных перемещений 8 м способен при КПД 80% вырабатывать до 4 млн. кВт·ч в год. Амплитуда колебаний поплавка может быть существенно (в 10-12 раз) увеличена за счет усовершенствования его конструкции. Для увеличения амплитуды (резонанса) вертикальный цилиндрический поплавок частично (в зависимости от параметров волны и поплавка) заполняется водой или к поплавку подвешивается груз соответствующей массы. Крупномасштабная модель резонансного поплавка, исследованная в Японии, имела диаметр 2,2 м, высоту 22 м, массу 13,5 т, пропеллерную турбину диаметром 0,8 м. Амплитуда колебаний поплавка достигала 8 м при волнах высотой от 0,5 до 1,5 м. На рисунке 5.5. показано устройство такой поплавокостанции. Здесь: 1– поплавок; 2–сжимаемая жидкость; 3– электротурбина с генератором.

Перечисленные выше типы волновых энергетических установок включают элементы, находящиеся на поверхности моря и поэтому подверженные воздействию не только расчетных, но и экстремальных штормовых волн. Для предотвращения такого воздействия можно располагать рабочее тело полностью под уровнем моря. В таких установках “бегущая волна” давления, обусловленная разностью давлений под гребнем и впадиной волны, используется для сжатия эластичных оболочек, уложенных на дно моря в направлении движения волны, или воздействия на горизонтальную площадку, укрепленную на опорах на дне моря. Толчки давления в оболочках или над горизонтальной площадкой используются для повышения давления и перемещения рабочей жидкости или газа. В Великобритании предложена установка “упругая труба”, способная воспринимать не только вертикальную, но и горизонтальную составляющую гидростатического давления. Исследования на модели показали высокую скорость реакции “трубы” на изменение волнового давления. В Бристольском университете Великобритании еще в 1976 г. была предложена установка под названием “бристольский цилиндр”. Установка представляет собой круговой цилиндр, полностью погруженный в поверхностный слой воды параллельно фронту волны. Цилиндр обладает



**Рис. 5.5. Схема поплавокостанции**

положительной плавучестью и удерживается в затопленном состоянии якорной системой, в связях которой устанавливаются нагрузочные устройства, например, гидроцилиндры. В Японии в эти годы сделали и испытали первую в мире крупномасштабную офшорную плавающую установку "Kaimei" в Японском море. Установка включала 9 генераторов на борту, которые были установлены выше волноприёмных камер, открытые ниже уровня воды. Волнение вызывало периодическое сжатие и разрежение воздуха, который прогоняли через воздушные турбины с приводом на генераторы. Кроме того в Японии были сделаны другие по типу крупные волновые установки, включая Caisson-type Oscillating Water Column prototype. Эта установка имеет 4 кессона с габаритными размерами каждого кессона 20,9 x 2 4,3 x 27,0 метра. Рабочая глубина воды составляла 18 м. Каждый кессон имел 4 открытых с фронтальной части отверстия, обращённых к набегающим волнам. Каждое отверстие соответствовало отдельному отсеку камеры, которые разделены стенками-перегородками. Поршневое действие осциллирующих водяных колонн вызывало движение воздуха через турбины Уэльса (1,34 м в диаметре, 16 лопастей). Использовали генераторы на 60 кВт каждый. Данный прототип испытывали в Японском море у порта Саката в префектуре Ямагата. Португалия реализует проект 0,5 мегаваттной береговой волновой энергетической установки на острове Рисо (Азорские Острова). Размеры бетонной компрессионной камеры составляют 12x12 м, а воздухопровод для воздушной турбины Уэльса имеет диаметр 2,3 м. В Индии построена пробная на 150 кВт также с турбиной Уэльса около острова Тривандрум.

Эдинбургская фирма Aquamarine Power сдала в эксплуатацию Европейскому исследовательскому центру морской энергии (European Marine Energy Centre), самую крупную в мире волновую электростанцию «Устрица» (Oyster), созданную при содействии ученых из Королевского университета в Белфасте (Queen's University Belfast).

Элементы «Устрицы», установленные на дне в ряд, похожи на растянутые автонасосы. Их вертикальные стенки собраны из пяти больших параллельных труб-поплавок. Волна, идущая к берегу наклоняет эту стенку (как будто бы слегка качает насос ногой) и та, поворачиваясь на петлях вокруг горизонтальной оси, приводит в действие поршень, нагнетающий воду в трубопровод высокого давления. Поступающая под давлением на берег вода крутит ротор электрогенератора. Разнос между морем и сушей устройства для сбора волновой энергии и электропреобразователя реализован впервые. Выгоды такого варианта размещения и впрямь очевидны: электрика на суше проработает дольше, и её обслуживать проще. Oyster уже включён в потребительскую электросеть и начал исправно питать энергией несколько сот домов на шотландском побережье. На сегодня в морях работают уже десятки сравнительно небольших волновых электростанций. Первая в мире крупная

коммерческая ВЭС начала генерировать ток в прошлом году в Португалии под городком Агусадора.

В целом создание волновых электростанций определяется оптимальным выбором акватории океана с устойчивым запасом волновой энергии, эффективной конструкцией станции, в которую встроены устройства сглаживания неравномерного режима волнения. Считается, что эффективно волновые станции могут работать при использовании мощности около 80 кВт/м. Опыт эксплуатации существующих установок показал, что вырабатываемая ими электроэнергия пока в 2-3 раза дороже традиционной, но в будущем ожидается значительное снижение ее стоимости. Мощные многомодульные волновые установки могут служить хорошей энергетической базой для создания экологически чистых объектов перерабатывающей промышленности морского и прибрежного базирования.

### **Контрольные вопросы**

Какая электростанция называется – волновая электростанция?

Каков принцип работы волновой электростанции использующей энергию колеблющегося водяного столба?

Какие энергетические установки называются поплавковыми?

Какие страны мира наиболее интенсивно развивают использование волновой энергии?

### **Лекция 6.**

#### **Энергия морских течений.**

Неисчерпаемыми запасами кинетической энергии обладают морские течения. Эту энергию, теоретически можно превратить в электрическую энергию с помощью турбин, погруженных в воду. Перспективным представляется использование таких мощных течений, как Гольфстрим и Курошио, несущих соответственно 83 и 55 млн. куб.м/с воды со скоростью до 2 м/с, и Флоридского течения (30 млн. куб.м/с, скорость до 1,8 м/с).

Самое известное морское течение – Гольфстрим. Его основная часть проходит через Флоридский пролив между полуостровом Флорида и Багамскими островами. Ширина течения составляет 60 км, глубина до 800 м, а поперечное сечение 28 км<sup>2</sup>. Энергию  $E$ , которую несет такой поток воды со скоростью 0,9 м/с, можно выразить при помощи следующего выражения:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \rho Sv^3$$

Здесь:  $m$  – масса воды;  $\rho$  – плотность воды; где: масса воды (кг),  $\rho$  – плотность воды (кг/м<sup>3</sup>),  $S$  – площадь поперечного сечения сечение (м<sup>2</sup>),  $v$  – скорость течения.

Подставив, выражение для энергии, соответствующие величины, получим:

$$E=50 \cdot 10^3 \text{ МВт.}$$

Если бы человечество смогло полностью использовать эту энергию, она была бы эквивалентна суммарной энергии от 50 крупных электростанций по 1000 МВт, Но эта цифра чисто теоретическая, а практически можно рассчитывать на использованиелишь около 10 – 15% энергии течения.

В настоящее время в ряде стран, и в первую очередь в Англии, ведутся интенсивные работы по использованию энергии морских волн. Британские острова имеют очень длинную береговую линию, многих местах которой море остается бурным в течение длительного времени. По предварительным оценкам, за счет энергии морских волн в английских водах можно было бы получить мощность до 120 ГВт, что вдвое превышает мощность всех электростанций Англии.

Программа "Кориолис" предусматривает установку во Флоридском проливе в 30 км восточнее города Майами 242 турбин с двумя рабочими колесами диаметром 168 м, вращающимися в противоположных направлениях. В качестве первичного двигателя таких установок предполагается использовать прямоточные турбины диаметром 168 м с частотой вращения 1 об/мин. Расстояние между лопастями турбины будет таково, чтобы обеспечить безопасный проход самых крупных рыб. Установка будет погружена на 30 м под уровень океана, с тем, чтобы не препятствовать судоходству. Два рабочих колеса размещаются внутри полой камеры из алюминия, обеспечивающей плавучесть турбины. Для повышения эффективности лопасти колес предполагается сделать достаточно гибкими. Вся система "Кориолис" общей длиной 60 км будет ориентирована по основному потоку; ширина ее при расположении турбин в 22 ряда по 11 турбин в каждом составит 30 км. Агрегаты предполагается отбуксировать к месту установки и заглубить на 30 м, чтобы не препятствовать судоходству.

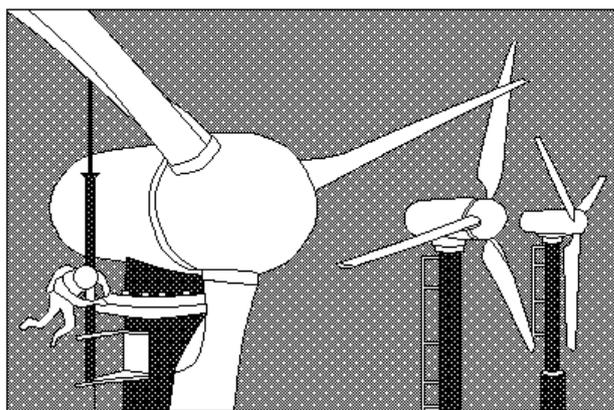
После того как большая часть Южного Пассатного течения проникает в Карибское море и Мексиканский залив, вода возвращается оттуда в Атлантику через Флоридский залив. Ширина течения становится минимальной - 80 км. При этом оно убыстряет свое движение до 2 м/с. Когда же Флоридское течение усиливается Антильским, расход воды достигает максимума. Развивается сила, вполне достаточная, чтобы привести в движение турбину с размашистыми лопастями, вал которой соединен с электрогенератором. Выработанная электроэнергия, по подводному кабелю, передается на берег. Материал турбины–алюминий. Теоретический срок службы – 80 лет. Турбина должна постоянно находиться под водой. Подъем на поверхность воды только для

профилактического ремонта. Работа турбины практически не зависит от глубины погружения и температуры воды. Лопасты вращаются медленно, и небольшие рыбы могут свободно проплывать через турбину. А вот крупным вход закрыт предохранительной сеткой.

Американские инженеры, считают, что строительство такого сооружения даже дешевле, чем возведение тепловых электростанций. Здесь не нужно возводить здание, прокладывать дороги, устраивать склады. Да и эксплуатационные расходы существенно меньше.

Полезная мощность каждой турбины с учетом затрат на эксплуатацию и потерь при передаче на берег составит 43 МВт, что позволит удовлетворить потребности штата Флориды (США) на 10%. Первый опытный образец подобной турбины диаметром 1,5 м был испытан во Флоридском проливе. Разработан также проект турбины с рабочим колесом диаметром 12 м и мощностью 400 кВт.

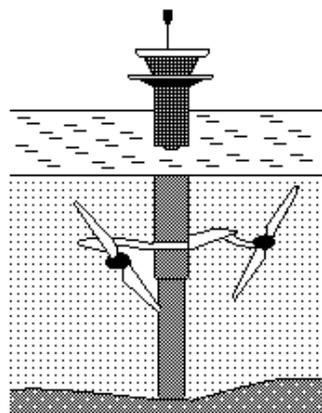
В Японии исследуется возможность использования энергии теплого течения Курошио, расход воды которого  $55 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ , а скорость у восточного побережья страны – 1,5 м/с. Для выработки электроэнергии предлагается применение двух трехлопастных гидротурбин с диаметром рабочего колеса 53 м. На рисунке 1.6. показано устройство такой станции. Недостатком данной электростанции является следующее. При установке устройства на дне моря потребуется усиленное уплотнение вала от пропуска морской воды, что снизит мощность гидрокоса, к тому же валу в месте уплотнения будет необходима смазка, иначе от трения вал деформирует уплотнение, а это приведет к пропуску воды в камеру генератора. Затруднен доступ к устройству для профилактики и ремонта. Еще один вариант конструкции электрической станции, которая использует энергию морского течения, приведен на рисунке 2.6. Эта станция представляет собой бетонную колонну, установленную на дне моря.



**Рис. 1.6. Устройство электрической станции, установленной на дне моря**

В подводной части колонны установлены два рабочих колеса связанных с двумя электрогенераторами, размещенными в верхней, надводной части колонны. Такая схема станции устраняет недостатки, связанные с необходимостью прочного уплотнения, и значительно

облегчает ремонтные и профилактические работы. В Шотландии уже запустили в работу подводную турбину, которая в скором времени станет частью достаточно мощной электростанции, вырабатывающей энергию благодаря использованию морских течений. Турбина установлена на глубине примерно 30 метров, не подалеку от Оркнейских островов. Разработкой проекта подводной электростанции занимается так же и компания Scottish Power Renewables. Такие



**Рис. 2.6. Устройство электрической станции, установленной на дне моря, имеющей надводную часть**

установки в океанах должны выдерживать очень суровые условия с подводными течениями и волнами, намного сильнее, чем, например, ветряные турбины, и по этой причине требуется их длительное тестирование на прочность.

### **Контрольные вопросы**

В чем заключается принцип работы электростанции, использующей энергию морских течений?

Какие существуют разновидности электростанции, использующей энергию морских течений?

Какие страны начинают использовать энергию морских течений?

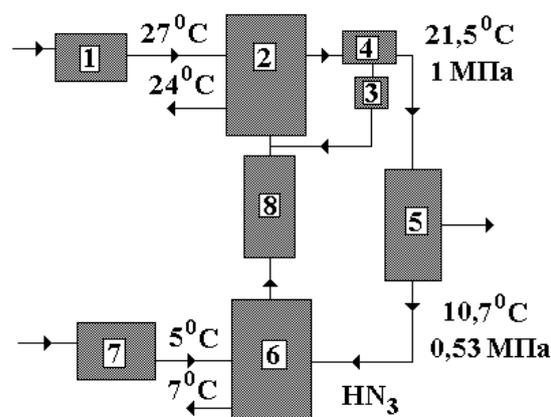
### **Лекция 7.**

#### **Тепловая энергия океана.**

Известно, что запасы энергии в Мировом океане колоссальны, ведь две трети земной поверхности (361 млн. км<sup>2</sup>) занимают моря и океаны. Действительно, акватория Тихого океана составляет 180 млн. км<sup>2</sup>, акватория Атлантического океана составляет 93 млн. км<sup>2</sup>, Индийского – 75 млн. км<sup>2</sup>. Известно, что тепловая энергия, обусловленная перегревом поверхностных вод океана, по сравнению с более глубокими его водами, на 20 градусов, соответствует величине примерно 10<sup>26</sup> Дж. Однако, люди умеют использовать лишь ничтожные доли этой энергии, да и то ценой больших и медленно окупающихся капиталовложений.

В течение последних десятилетий ситуация несколько изменилась. Создано несколько установок преобразующих тепловую энергию океана в электрическую энергию. Эти установки получили название: мини – ОТЕС и ОТЕС-1 (ОТЕС – начальные буквы английских слов Ocean Thermal Energy Conversion, т.е. преобразование тепловой энергии океана. Технология преобразования тепловой энергии океана в электрическую использует разницу температур в воде на поверхности океана и глубоких слоях воды для производства электроэнергии. Чтобы запустить рабочий цикл на такой электростанции разница температур должна быть как минимум 20 градусов. Следовательно, этот способ получения электрической энергии подходит для более теплых морских районов. Теплая вода используется, чтобы выпарить жидкость, кипящую на низких температурах, производя пар, который приводит в движение турбину. Холодная морская вода (4–6 градусов) затем закачивается с глубины нескольких сотен метров и используется для охлаждения и конденсации пара обратно в жидкое состояние.

В августе 1979 г. вблизи Гавайских островов начала работать теплоэнергетическая установка мини–ОТЕС. Пробная эксплуатация установки в течение трех с половиной месяцев показала ее достаточную надежность. При непрерывной круглосуточной работе не было срывов, если не считать мелких технических неполадок, обычно возникающих при испытаниях любых новых установок. Ее полная мощность составляла в среднем 48,7 кВт, максимальная – 53 кВт; 12 кВт (максимум 15) установка отдавала во внешнюю сеть на полезную нагрузку, точнее - на зарядку аккумуляторов. Остальная вырабатываемая мощность расходовалась на собственные нужды установки. В их число входят затраты энергии на работу трех насосов, потери в двух теплообменниках, турбине и в генераторе электрической энергии. Три насоса потребовались из следующего расчета: один – для подачи теплой воды из океана, второй – для подкачки холодной воды с глубины около 700 м, третий – для перекачки вторичной рабочей жидкости внутри самой системы, т. е. из конденсатора в



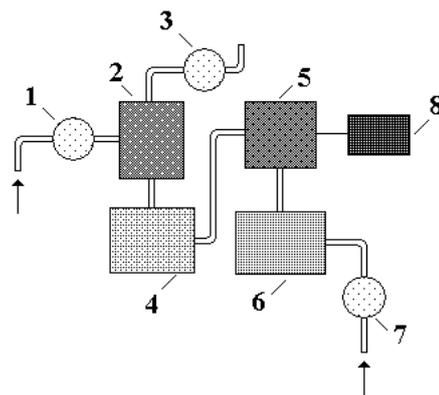
**Рис. 1.7. Схема теплоэнергетической установки, работающей по замкнутому циклу**

испаритель. В качестве вторичной рабочей жидкости применяется аммиак. Установка мини-ОТЕС смонтирована на барже. Под ее днищем помещен длинный трубопровод для забора холодной воды. Трубопроводом служит полиэтиленовая труба длиной 700 м с внутренним диаметром 50 см. Трубопровод прикреплен к днищу судна с помощью особого затвора, позволяющего в случае необходимости его быстрое отсоединение. Полиэтиленовая труба одновременно используется и для закоривания системы труба - судно. Оригинальность подобного решения не вызывает сомнений, поскольку якорные постановки для разрабатываемых ныне более мощных систем ОТЕС являются весьма серьезной проблемой. На рисунке 1.7. показана схема описанной установки. Здесь: 1 – насос теплой воды; 2 – испаритель; 3 – насос осушителя парообразного рабочего тела; 4 – осушитель; 5 – турбина с электрогенератором; 6 – конденсатор; 7 – насос для забора холодной воды; 8 – насос для подачи рабочего тела. В такой установке теплые, поверхностные воды океана, прокачиваются насосом через теплообменник испарителя и превращают в пар какое-либо подходящее рабочее тело (аммиак, фреон, пропан). Создается пар повышенного давления, который, расширяется через турбину в холодильник, где конденсируется при контакте с охлаждаемыми поверхностями второго теплообменника, омываемого водой, закачиваемой из глубинных слоев океана. Впервые в истории техники установка мини-ОТЕС смогла отдать во внешнюю нагрузку полезную мощность, одновременно покрыв и собственные нужды. Опыт, полученный при эксплуатации мини-ОТЕС, позволил быстро построить более мощную теплоэнергетическую установку ОТЕС-1 и приступить к проектированию еще более мощных систем подобного типа. В настоящее время проектируются станции ОТЕС на мощность во много десятков и сотен мегаватт, которые будут работать без судов. Это одна огромная труба, в верхней части которой находится круглый машинный зал, где размещены все необходимые устройства для преобразования энергии. Верхний конец трубопровода холодной воды расположится в океане на глубине 25–50 м. Машинный зал проектируется вокруг трубы на глубине около 100 м. Там будут установлены турбоагрегаты, работающие на парах аммиака, а также все остальное оборудование. Масса всего сооружения превышает 300 тыс. т. Труба, уходящая почти на километр в холодную глубину океана, а в ее верхней части что-то вроде маленького островка. И никакого судна, кроме, конечно, обычных судов, необходимых для обслуживания системы и для связи с берегом.

Схема теплоэнергетической установки, работающей по открытому циклу (цикл Клода), показана на рисунке 2.7. Здесь: 1 – насос для подачи теплой воды; 2 – деаэрактор; 3 – вакуумный насос; 4 – испаритель; 5 – турбина; 6 – конденсатор; 7 – насос для подъема холодной воды; 8 – электрогенератор. В качестве рабочего тела в этой установке здесь использована морская вода,

подаваемая в испаритель через деаэратор. Наличие деаэратора диктуется необходимостью освобождения морской воды от растворенных в ней газов. Предварительно из объемов испарителя и конденсатора удаляется воздух, так что давление над поверхностью жидкости определяется только давлением насыщенных паров, которое сильно зависит от температуры. При характерных для ОТЭС температурах этот перепад составляет примерно 1,6 кПа (при замкнутом цикле на аммиаке около 500 кПа), под действием этого перепада пары воды приводят в движение турбину. Турбина, в свою очередь приводит в действие электрогенератор. Проходя через турбину пары воды попадают в конденсатор, где и опять превращаются в жидкость.

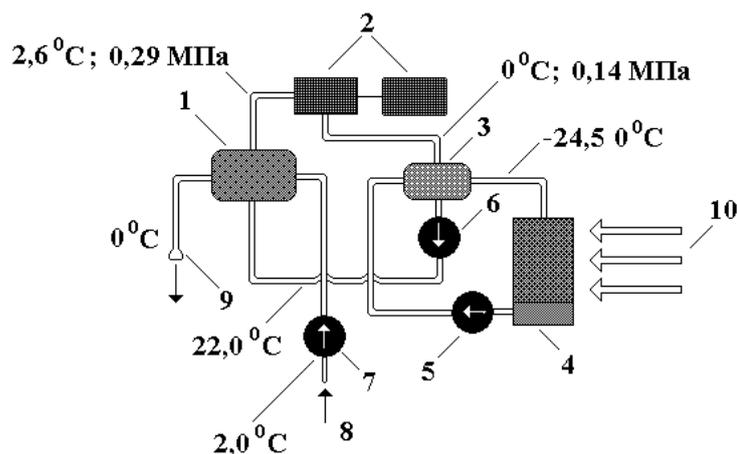
Основное отличие такого цикла состоит в малости перепада давлений, что требует использования соответствующих гигантских турбин диаметром в несколько десятков метров. Это, пожалуй, основной технический недостаток систем открытого цикла. Основное же их достоинство – отсутствие гигантских нетехнологичных теплообменников. Кроме того, при работе систем открытого цикла могут быть получены большие количества пресной воды, что немаловажно в жарком поясе планеты. Так же были предложены различные



**Рис. 2.7. Схема ОТЭС, работающей по открытому циклу**

устройства для выработки электрической энергии за счет перепада температур между холодным воздухом и незамерзающей водой (например, подо льдами Арктики). Эти устройства похожи на обычные тепловые станции с градирнями для охлаждения отработавшей воды. Но здесь градирни работают в условиях, когда температура наружного воздуха много ниже нуля, а охлаждаемая жидкость имеет температуру всего на несколько градусов выше. Поэтому, для эффективной работы такой станции, в охлаждающем контуре, необходимо использовать жидкость с низкой температурой замерзания. В качестве промежуточного теплоносителя применяется водный раствор хлористого кальция с концентрацией не менее 26 кг на 100 кг воды, который достаточно широко используется в холодильной технике. Рабочим телом в основном контуре станции служит фреон -12, пары которого приводят в движение турбину с электрогенератором. На рисунке 3.7. показана схема ОТЭС с обдуваемыми воздухом теплообменниками. На этом рисунке: 1 – испаритель основного контура; 2 – турбина с электрогенератором; 3 – конденсатор; 4 – теплообменник контура охлаждения промежуточного рабочего тела; 5 – насос для подачи хладагента; 6 – насос для подачи рабочего тела; 7 – насос для подачи морской воды; 8 – водозаборник; 9 – система сброса отработанной воды; 10 – обдув холодным воздухом. В конструкции этой станции промежуточный теплоноситель охлаждается путем разбрызгивания

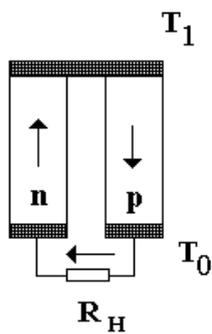
через форсунки оросительного охладителя. Причем важно обеспечить определенное распыление, чтобы, с одной стороны, капли теплоносителя не выносились потоком холодного воздуха, а с другой – успевали охладиться во время падения. Для того чтобы капля диаметром 1 мм охладилась на  $2^{\circ}\text{C}$  при движении в воздухе со средней разностью температур  $30^{\circ}\text{C}$  ей необходимо пролететь в свободном падении чуть более 3 м. Распыляя таким образом раствор хлористого кальция, можно добиться удельного съема энергии более  $230 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Это позволяет снизить металлоемкость конденсаторов и примерно на 20 % увеличить выработку полезной энергии.



**Рис. 3.7. Схема арктической ОТЭС на перепаде вода-воздух**

Простейшие системы использования тепловой энергии океана уже нашли реальное воплощение. В районе Нью-Йорка построена электростанция мощностью 7180 киловатт, использующая тепло океанской воды. Отработавший пар не сбрасывается в море, а конденсируется и образует конденсат – пресную дистиллированную воду. Таким образом, кроме электроэнергии станция еще вырабатывает 22680 тонн пресной воды в сутки. В Карибском море создан целый энергобиологический комплекс, который решает множество задач: производит электрическую энергию в низкотемпературных парогенераторных установках; выращивает планктон в мелководных бассейнах, подогреваемых отработавшим паром; разводит креветок и омаров, питающихся планктоном; разводит водоросли, поглощающие выделения омаров и креветок.

Существует и прямой способ преобразования тепловой энергии в электрическую энергию. В основе этого способа лежит известный в физике полупроводников эффект Зеебека. Эффект Зеебека заключается в возникновении термоэлектродвижущей силы в электрической цепи, составленной из материалов с различной концентрацией носителей заряда, места соединений которых нагреты до разных температур.



**Рис. 4.7. Устройство простейшего термоэлектрогенератора**

Рассмотрим механизм возникновения термоэлектродвижущей силы в полупроводниковых материалах. Пусть полупроводник n-типа проводимости имеет форму длинного тонкого бруска с металлическими контактами на обоих концах. Если один из концов полупроводникового бруска имеет более высокую температуру по сравнению с другим концом, тепловая энергия свободных электронов на этом конце выше, чем на холодном его конце. Следовательно, эти более энергичные электроны, будут передвигаться к холодному концу в большем

количестве, чем в обратном направлении. В результате такого перемещения холодный конец полупроводника будет заряжаться отрицательно, а нагретый конец, вследствие ухода электронов, приобретает положительный заряд. В случае полупроводника р-типа проводимости на холодном конце образуется избыток положительного заряда, а на горячем его конце образуется избыток отрицательного заряда. Если полупроводник изолирован, то по мере увеличения разности потенциалов на его концах, возрастает электрическое поле, препятствующее дальнейшему разделению зарядов. Однако, если полупроводник, в котором имеется разность температур, составляет часть замкнутой электрической цепи, то процесс разделения зарядов не прекращается и электрической цепи протекает ток. В существующих конструкциях, с целью получения больших значений тока, электрическая цепь составляется из полупроводниковых элементов n и р типов проводимости. В этом случае токи совпадают по направлению и усиливают друг друга. На рисунке 4.7. показано устройство простейшего термоэлектрогенератора, составленного из двух полупроводниковых материалов с различными типами проводимости. Металлическая пластина, соединяющая два полупроводника, нагревается каким либо источником тепла ( $T_1 > T_0$ ). Два противоположных охлаждаемых конца полупроводников соединены с цепью нагрузки ( $R_H$ ), которая и использует, создаваемую термоэлементом, электроэнергию. В этой конструкции генерируемый ток направлен в полупроводнике р-типа проводимости от горячего конца к холодному, а в полупроводнике n-типа проводимости от холодного к горячему.

Если температура горячих концов термоэлемента равна  $T_1$ , а холодных его концов равна  $T_0$ , то удельная термоэлектродвижущая сила (термо-э.д.с.) равна сумме удельных термо-э.д.с. отдельных его ветвей:

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_p$$

Полную термо-э.д.с. элемента можно выразить при помощи следующего выражения:

$$E = (\alpha_n + \alpha_p)(T_1 - T_0) \quad (1.7)$$

Ток, протекающий через нагрузочное сопротивление:

$$I = \frac{E}{R_n + R_0} \quad (2.7)$$

Здесь:  $R_n$  - сопротивление нагрузки;  $R_0$  - внутреннее сопротивление термоэлемента.

Полезная мощность, которую можно получить в нагрузке, определяется так:

$$P_n = IU \quad (3.7)$$

Здесь  $U$  - напряжение на нагрузочном сопротивлении, которое можно записать в виде:

$$U = \frac{ER_n}{R_n + R_0} \quad (4.7)$$

Используя выражения (2.7) - (4.7) получим:

$$P_n = \frac{(\alpha_n + \alpha_p)^2 (T_1 - T_0)^2 R_n}{(R_n + R_0)^2} \quad (5.7)$$

Наибольшее значение полезная мощность достигается при условии  $R_n = R_0$

$$P_{n\max} = \frac{(\alpha_n + \alpha_p)^2 (T_1 - T_0)^2}{4R_n} \quad (6.7)$$

Одним из основных параметров термоэлемента является коэффициент полезного действия  $\eta$ . Этот коэффициент определяется как отношение полезной мощности  $P_n$  к тепловой энергии сообщаемой горячему концу термоэлемента:

$$\eta = \frac{P_n}{Q} \quad (7.7)$$

Величина коэффициента полезного действия термоэлектродгенератора зависит от удельных термо-э.д.с. составляющих элементов; от коэффициента теплопроводности полупроводникового материала  $\chi$  и от его удельной электрической проводимости  $\sigma$ :

$$\eta \approx \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi} (T_1 - T_0)$$

При определении реальной величины коэффициента полезного действия необходимо учитывать наличие потерь тепла за счет теплопроводности к холодным концам термоэлектродгенератора, и потери, обусловленные

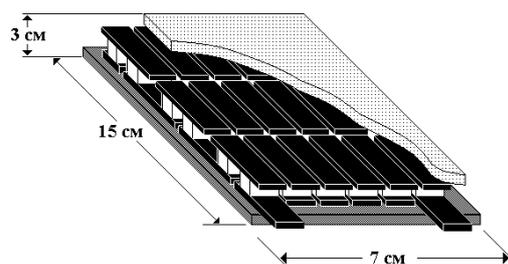
нагреванием протекающим током. Реальные значения коэффициента полезного действия термоэлектродгенератора лежат в пределах 10-30%. Отдельные пары элементов термоэлектрических генераторов генерируют малое напряжение. Для получения необходимых значения токов и напряжений, отдельные элементы соединяются в батареи последовательно – для получения больших напряжений и параллельно – для получения



**Рис. 5.7. Последовательное соединение термоэлектродгенераторов**

больших токов. При таком последовательно–параллельном соединении повышается и отдаваемая мощность. На рисунке 5.5. показан пример последовательного соединении элементов термоэлектродгенераторов.

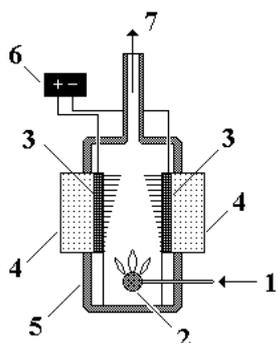
На рисунке 6.7. показан внешний вид одного из маломощных термоэлектродгенераторов, выпускаемого промышленностью. Этот термоэлектродгенератор отдает в нагрузку мощность около 16 Вт, при наличии перепада температур в 20-25 градусов, между его нагреваемой и охлаждаемой поверхностями.



**Рис. 6.7. Внешний вид одного из маломощных термоэлектродгенераторов**

Термоэлектрические батареи обладают следующими основными преимуществами перед другими источниками электропитания: они характеризуются длительным сроком службы и практически неограниченным сроком хранения при полной готовности к работе в любое время, не требуют специального обслуживания, устойчивы в работе, дают стабильное напряжение, не боятся короткого замыкания и режима холостого хода. Кроме того, ввиду отсутствия движущихся частей термоэлектрические генераторы полностью бесшумны в работе, что дает им преимущество перед машинными источниками постоянного напряжения. Благодаря этим свойствам термоэлектрические генераторы находят применение в областях, где требуются надежные источники электроэнергии, обладающие длительным сроком эксплуатации и не требующие обслуживания: автоматические метеостанции, морские маяки, автономные космические аппараты. В качестве источников тепла в них могут использоваться радиоактивные изотопы или ядерные реакторы. Для

работы автоматики газовых буровых скважин применяются ТЭГ, использующие перепад температур окружающей среды и газа из скважины. Для коттеджей и загородных домов разработан ТЭГ мощностью 200 Вт. Он представляет собой газовый котел, вырабатывающий одновременно тепло для отопления и электроэнергию. Этот генератор позволяет обеспечить бесперебойное электропитание системы отопления (автоматики, циркуляционных насосов), что делает ее полностью независимой от внешней электросети. Кроме того, это устройство может являться резервным источником электропитания для широкого спектра бытовых приборов. На рисунке 7.7. показана конструкция этого термоэлектрического генератора. На этом рисунке: 1 – подвод газа; 2 – газовая горелка;



**Рис. 7.7. Устройство термоэлектрического генератора**

3– термоэлектрические батареи; 4 –водяные теплообменники; 5 –корпус генератора; 6 – система съема генерированной электроэнергии; 7 – вывод тепла. Устройство работает следующим образом: продукты сгорания природного газа, пропана или пропан - бутановой газовой смеси нагревают ребра термоэлектрических батарей. Другие стороны батарей охлаждаются водой. За счет образованной разности температур на концевых шинах батарей (+) и (-) генерируется электрическая энергия. Мощность по

электроэнергии составляет 200 Вт (постоянный ток – 24 В), мощность по теплу – 6-8 кВт, общий КПД достигает 90%. Срок службы – не менее 20 лет. Габаритные размеры (ориентировочно) – 600x330x300 мм. Вес (ориентировочно) – 40 кг. В литературе описаны и другие устройства использующие термоэлектрические батареи. Одно из таких устройств показано на рисунке 8.7. Здесь термоэлектрическая батарея, помещенная в гидроизоляционный корпус, устанавливается на поверхности воды. Разность температур батареи, обусловленная нагревом солнечного излучения и охлаждением потоком воды, обеспечивает генерацию электричества. Подобные установки наиболее эффективны при больших перепадах температур, как, например, в морях: на глубине вода очень холодна – около 4С, а на поверхности нагревается до 25 С, что составляет примерно 20 градусов разницы. Все необходимые инженерные разработки уже проведены и опробованы экспериментально (например, у атолла Каваратти в Лаккадивском архипелаге около юго-западного побережья Индии).

Схема электрической станции на термоэлектрических преобразователях, использующей разницу температур морской воды, показана на рисунке 9.7. На этом рисунке: 1 – корпус термоэлектрической станции; 2 – батарея термоэлектрических генераторов;  $T_1$ ,  $T_2$  – система

впуска и выпуска теплой воды;  $T_3, T_4$  – система впуска и выпуска холодной воды.

В Японии, в Иокогамском университете, была создана установка по производству водорода из морской воды, представляющая собой батареи термоэлементов, поглощающих солнечные лучи. Солнечная энергия при помощи специальных линз концентрируется на концах термоэлементов, а противоположные концы охлаждаются морской водой. Возникающий в термоэлементах, вследствие разности температур, электрический ток разлагает воду на кислород и водород. Блок термоэлементов площадью 10 квадратных метров может обеспечить получение 10000 кубических метров водорода в год.

К недостаткам электростанций на основе термоэлектрических преобразователей относятся достаточно высокая стоимость материалов, из которых изготавливаются элементы, и необходимость изолировать спаи от непосредственного контакта с морской водой. При контакте с водой происходит шунтирование через воду соседних термоэлементов элементов, и, следовательно, снижение мощности, выдаваемой в цепь нагрузки. В свою очередь, изолирование спаев приводит к удорожанию преобразователей и ухудшению их показателей. Работы, выполненные группой исследователей из университета Осаки (Япония), показывают, что при отсутствии изолятора в несколько раз увеличивается съём полезной мощности. Однако необходимо иметь в виду, что в опытах японских исследователей в качестве носителя энергии использовалась не сама морская вода, а фторуглеродистые соединения.

### Контрольные вопросы

- Чем вызвана потребность использования тепловой энергии океана?
- На чем основана технология преобразования тепловой энергии океана в электрическую энергию?



Рис. 8.7. Гидроизолированная термоэлектрическая батарея, установленная на поверхности воды

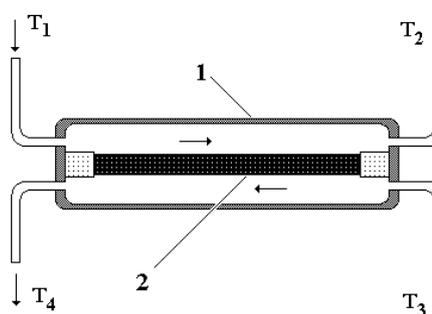


Рис. 9.7. Схема ОТЭС на термоэлектрических преобразователях

В чем различие энергетических установок, использующих тепловую энергию океана, работающих по открытому и по замкнутому циклу?

Какое физическое явление лежит в основе прямого способа преобразования тепловой энергии в электрическую энергию?

В чем заключается эффект Зеебека?

Какое устройство называется термоэлектрическим генератором?

Каковы основные достоинства и недостатки электростанций на основе термоэлектрических преобразователей?

## Лекция 8.

### Гео и гидротермальная энергетика.

Около 4% всех запасов воды на нашей планете сосредоточено под землей – в толщах горных пород. Воды, температура которых превышает 20° С, называют термальными (от греческого слова «терме» – «тепло», «жар»). Нагреваются подземные озера и реки в результате радиоактивных процессов и химических реакций, протекающих в недрах Земли. В районах вулканической деятельности на глубине 500-1000 м встречаются бассейны с температурой 150-250 °С, вода в них находится под большим давлением и, поэтому не кипит. В горных областях термальные воды нередко выходят на поверхность в виде горячих источников с температурой до 90 °С.

Энергетика земли - геотермальная энергетика базируется на использовании природной теплоты Земли. Верхняя часть земной коры имеет термический градиент, равный 20-30 °С в расчете на 1 км глубины, и, по данным Уайта (1965 г.), количество теплоты, содержащейся в земной коре до глубины 10 км (без учета температуры поверхности), равно приблизительно  $12,6 \cdot 10^{26}$  Дж. Эти ресурсы эквивалентны теплосодержанию  $4,6 \cdot 10^{16}$  т угля (принимая среднюю теплоту сгорания угля равной  $27,6 \cdot 10^9$  Дж/т), что более чем в 70 тыс. раз превышает теплосодержание всех технически и экономически извлекаемых мировых ресурсов угля. Однако геотермальная теплота в верхней части земной коры (до глубины 10 км) слишком рассеяна, чтобы на ее базе решать мировые энергетические проблемы. Ресурсы, пригодные для промышленного использования, представляют собой отдельные месторождения геотермальной энергии, сконцентрированной на доступной для разработки глубине, имеющие определенные объемы и температуру, достаточные для использования их в целях производства электрической энергии или теплоты.

С геологической точки зрения геотермальные энергоресурсы можно разделить на гидротермальные конвективные системы, горячие сухие

системы вулканического происхождения и системы с высоким тепловым потоком.

Люди научились использовать глубинное тепло Земли в хозяйственных целях. В странах, где термальные воды подходят близко к поверхности, сооружают геотермальные электростанции (геоТЭС). Они преобразуют тепловую энергию подземных источников в электрическую. В России первая геоТЭС мощностью 5 МВт была построена в 1966 г. на юге Камчатки, в долине реки Паужетка, в районе вулканов Кошелева и Кабального. В 1980 г. ее мощность составляла уже 11 МВт. В Италии, в районах Ландерелло, Монте-Амиата и Травеле, работают 11 таких станций общей мощностью 384 МВт. ГеоТЭС действуют также в США (в Калифорнии, в Долине Больших Гейзеров), Исландии (у озера Миватн), Новой Зеландии (в районе Уайракеи), Мексике и Японии.

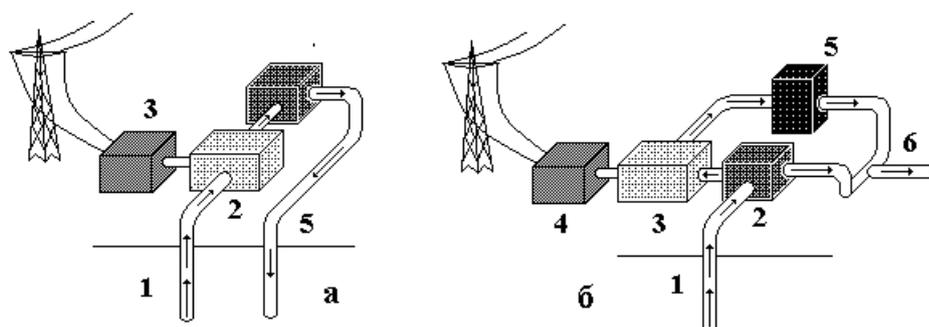
Геотермальные станции устроены относительно просто: здесь нет котельной, оборудования для подачи топлива, золоулавливателей и многих других приспособлений, необходимых для обычных тепловых электростанций. Постольку топливо у геоТЭС бесплатное, то и себестоимость вырабатываемой электроэнергии в несколько раз ниже.

В принципе для производства электроэнергии на месторождениях с горячей водой применяется метод, основанный на использовании пара, образовавшегося при испарении горячей жидкости на поверхности. Этот метод использует то явление, что при приближении горячей воды (находящейся под высоким давлением) по скважинам из бассейна к поверхности давление падает и около 20 % жидкости вскипает и превращается в пар. Этот пар отделяется с помощью сепаратора от воды и направляется в турбину. Вода, выходящая из сепаратора, может быть подвергнута дальнейшей обработке в зависимости от ее минерального состава. Эту воду можно закачивать обратно в скальные породы сразу или, если это экономически оправдано, с предварительным извлечением из нее минералов. Примерами геотермальных месторождений с горячей водой являются Уайракей и Бродлендс в Новой Зеландии, Серро-Прието в Мексике, Солтон-Си в Калифорнии, Отаке в Японии.

Другим методом производства электроэнергии на базе высоко- или среднетемпературных геотермальных вод является использование процесса с применением двухконтурного (бинарного) цикла. В этом процессе вода, полученная из бассейна, используется для нагрева теплоносителя второго контура (фреона или изобутана), имеющего низкую температуру кипения. Пар, образовавшийся в результате кипения этой жидкости, используется для привода турбины. Отработавший пар конденсируется и вновь пропускается через теплообменник, создавая тем самым замкнутый цикл. Установки, использующие фреон в качестве теплоносителя второго контура, о настоящее время подготовлены для промышленного освоения в диапазоне температур 75–150 °С и при единичной электрической мощности в пределах 10–100 кВт. Такие установки могут быть использованы для произ-

водства электроэнергии в подходящих для этого местах, особенно в отдаленных сельских районах.

Существует несколько схем получения электроэнергии на геотермальной электростанции. Прямая схема: природный пар направляется по трубам в турбины, соединенные с электрогенераторами. Непрямая схема: пар предварительно (до того как попадает в турбины) очищают от газов, вызывающих разрушение труб. Смешанная схема: неочищенный пар поступает в турбины, а затем из воды, образовавшейся в результате конденсации, удаляют не растворившиеся в ней газы. Именно по смешанной схеме работает Паужетская электростанция. Пароводяная смесь, содержащая тепло в количестве 840 кДж/кг, выводится через буровую скважину глубиной 350 м на поверхность и направляется в сепарационное устройство. Здесь пар при давлении 225 кПа отделяется от воды и по трубам поступают в турбины; те вращаются и приводят в действие электрогенераторы. Отработавший в турбинах пар попадает в смешивающий конденсатор, где охлаждается и превращается в воду. Выделившиеся при этом газы (азот и кислород) удаляют насосом. Горячую воду (120 °С) используют для теплоснабжения населенных пунктов. Вода для охлаждения пара подается самотеком по трубопроводу длиной 600 м из реки Паужетки. На рисунке 1.8. показаны обе схемы получения электроэнергии при помощи геотермальной электростанции. На рисунке 1.6.а. показаны: 1 – источник горячего пара; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – устройство для конденсации воды; 5 – конденсат. На рисунке 1.5.б. показаны: 1 – источник горячей воды; 2 – сепаратор; 3 – турбина; 4 – генератор; 5 – устройство для конденсации воды (конденсатор); 6 – сброс отработанной воды.



**Рис. 1.8. Схемы получения электроэнергии при помощи геотермальной электростанции**

В России, Болгарии, Венгрии, Грузии, Исландии, США, Японии и в других странах с термальными водами обогревают здания, теплицы, парники и плавательные бассейны. А столица Исландии Рейкьявик получает тепло исключительно от горячих подземных источников.

Зарубежный опыт показывает, что затраты на строительство геотермальных электростанций получаются очень больше. Однако

поскольку эта энергия "дармовая", предлагаемая нам самой природой и к тому же возобновляемая, отопление потом становится дешевле в два раза. Для обеспечения экологической чистоты в технологической схеме геотермальных электростанций предусмотрены система закачки конденсата и сепарата обратно в земные пласты, а также системы снеготаяния и предотвращения выбросов сероводорода в атмосферу. По мнению некоторых ученых, большой прогресс по удешевлению и уменьшению эксплуатационных издержек будет достигнут применением в геотермальных турбинах верхнего выхлопа отвода пара.

Геотермальный вид возобновляемой энергии широко используется в мире. Артезианские бассейны термальных вод выявлены в Саяно-Байкальской горной системе, в Бурятии (здесь насчитывается около 400 термальных источников), в Якутии, на севере Западной Сибири, Чукотке (здесь известны 13 высокотермальных источников с суммарным дебитом 166 л/с). Самый "горячий" район – Курило-Камчатский вулканический пояс. На Камчатке выявлено более 70 групп термальных источников, 40 из них имеют температуру воды 90-100°C. Наиболее крупные источники дают столько тепла, сколько можно получить от сжигания 200 тысяч тонн угля. Себестоимость получения 4.2 ГДж тепла в системах геотермального теплоснабжения Камчатки в 10 раз ниже, чем в котельных Петропавловска-Камчатского.

Сегодня геотермальную энергию используют в 40 странах мира. В Швейцарии 10 тысяч теплоносителей забирают тепло из-под грунта. Сотни тысяч киловатт дают станции районов Лардерелло в Италии, Вайракей в Новой Зеландии. Треть электроэнергии для Сан-Франциско также дают геотермальные станции. Сегодня мощность канадских ГеоТЭС достигла 0.7 млн. кВт. Поляки начали заниматься геотермальной энергией десять назад. В Польше есть уже четыре геотермальные станции. Одна из них, в курортном Закопане. В Литве вся Клайпеда обеспечивается горячей водой с помощью геотермальной станции.

В Японии с помощью геотермальной энергетики растапливают снег на дороге. Геотермальная энергетика в Японии занимает значительное место - ее доля составляет 21 % . Основным сдерживающим фактором для развития стали экологические движения. Это связано с тем, что станции расположены в природных парках и дальнейшее их развитие затруднено опасностью нанести ущерб охраняемым и заповедным территориям. Ядерные станции дают 35% общего энергопроизводства, работающие на природном газе – 24%. У нас максимум потребления электроэнергии приходится на зимние, самые холодные месяцы, а в Японии – на лето, когда из-за жары основное потребление электроэнергии связано с работой оборудования, вырабатывающего холодный воздух.

Следует отметить, что дальше всех в использовании геотермальных ресурсов продвинулась Исландия. Например, столица Исландии Рейкьявик с 1943 года использует геотермальные воды для обогрева домов,

учреждений, магазинов и фабрик. Установленная мощность всех исландских геотермальных станций еще в 1988 г. составляла 39 МВт.

В перспективе для извлечения энергии из недр Земли можно использовать не только запасы горячей воды и пара, но и тепло сухих горных пород. Области сухих горных пород с температурой около 300<sup>0</sup>С встречаются значительно чаще, чем водоносные горячие породы, а также энергию магматических очагов, которые в некоторых районах планеты расположены на глубинах всего в несколько километров.

Однако на сегодняшний день, наиболее оптимальная форма использования тепловой энергии – сухой пар. Прямое использование смеси пара и воды невозможно, т.к. геотермальная вода содержит обычно большое количество солей, вызывающих коррозию, и капли воды в паре могут повредить турбину. Наиболее частая форма поступления энергии - просто в виде горячей воды, прежде всего для получения тепла. Эта вода может быть использована также для получения пара рабочей жидкости, имеющей более низкую температуру кипения, чем вода. Так как геотермальный пар и вода имеют сравнительно низкую температуру и давление, КПД геотермальных станций не превышает 20%, что значительно ниже атомных (30%) и тепловых работающих на ископаемом топливе (40%). К недостаткам геотермальных станций относится следующее: для конденсации пара на геотермальных станциях необходимо большое количество охлаждающей воды, которая в результате работы станции нагревается, поэтому геотермальные станции являются источниками теплового загрязнения. При одинаковой мощности с тепловыми электростанциями, геотермальная электростанция потребляет для охлаждения значительно большее количество воды, т.к. ее КПД ниже. Сброс сильно минерализованной геотермальной воды в поверхностные водоемы может привести к нарушению их экосистем. В геотермальных водах в больших количествах содержится сероводород и радон, который вызывает может привести к радиоактивным загрязнениям окружающей среды.

### **Контрольные вопросы**

Чем вызвана потребность использования энергии горячих, подземных вод?

Как устроены геотермальные станции?

Какие существуют методы производства электроэнергии на базе высоко или среднетемпературных геотермальных вод?

Какие страны мира используют геотермальную энергию?

В чем заключаются основные преимущества и недостатки геотермальных электростанций?

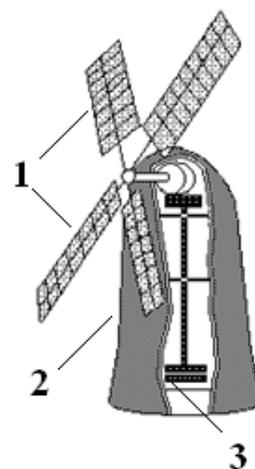
## Лекция 9. Ветровая энергия

Мы живем на дне воздушного океана, в мире ветров. На нашей планете постоянно и повсюду дуют ветры - от легкого ветерка, до могучих ураганов. Кинетическая энергия движущихся воздушных масс - огромна. По оценкам различных авторов, общий ветроэнергетический потенциал Земли равен 1200 ТВт, однако возможности использования этого вида энергии в различных районах Земли неодинаковы. Среднегодовая скорость ветра на высоте 20–30 м над поверхностью Земли должна быть достаточно большой, чтобы мощность воздушного потока, проходящего через надлежащим образом ориентированное вертикальное сечение, достигала значения, приемлемого для преобразования.

Идея использовать силу ветра известна давно: в Персии и Египте ветряные мельницы – прообраз современных ветрогенераторов - использовались уже в III веке до нашей эры. А в XV веке мельницы использовались уже повсеместно, более того в Голландии конструкция была модернизирована и стала применяться для решения таких задач как осушение болот и поднятие грузов. В качестве примера на рисунке 1.9. показано устройство ветряной мельницы. Здесь: 1 – лопасти ветрового колеса; 2 – корпус; 3 – мельничные жернова.

До середины прошлого столетия ветродвигатели существовали преимущественно в виде «классических» крестьянских мельниц. Это было обусловлено тем, что по своей эффективности ветродвигатели не могли конкурировать как с дизельными электростанциями, так и гидроэлектростанциями. Однако к концу XX века нефть существенно подорожала и, по данным некоторых аналитиков, ее запасов хватит не более чем на 60–80 лет. Значит, необходим поиск других источников энергии, в частности – энергии ветра.

В начале века Н.Е. Жуковский разработал теорию ветродвигателя, на основе которой могли быть созданы высокопроизводительные установки, способные получать энергию от самого слабого ветерка. Появилось множество проектов ветроагрегатов, несравненно более совершенных, чем старые ветряные мельницы. В новых проектах используются достижения многих отраслей знания. Однако, несмотря на двухтысячелетнюю историю разнообразных усовершенствований, принцип действия всех ветродвигателей остался практически неизменным. Разница лишь в том, что когда - то колесо с лопастями, вращающееся под напором ветра, через систему передач посылало крутящий момент на мельничные жернова, а сейчас он передается на вал генератора, вырабатывающего ток.



**Рис. 1.9. Устройство ветряной мельницы**



**Рис. 2.9. Принцип получения переменного электрического тока**

Напомним, что работа всех современных генераторов электрического тока основана на явлении электромагнитной индукции при движении проводника в магнитном поле. На рисунке 2.9. показан принцип получения переменного электрического тока. Электродвижущая сила возникает при вращении замкнутого проводника в постоянном магнитном поле. В качестве замкнутого проводника как, правило, используется проволочная обмотка. Концы этой обмотки присоединены к двум медным

контактным кольцам, укрепленных на одной оси вращения. При вращении замкнутого проводника он постоянно пересекает магнитный поток, величина которого определяется при помощи следующего соотношения:

$$\Phi = BS \cos \alpha = \Phi_0 \cos \alpha$$

Здесь:  $\alpha$  - угол, соотнесенный нормалью  $n$  к плоскости витка и вектором индукции магнитного поля  $B$ ;  $\Phi_0$  - максимальное значение потока при  $\alpha = 0$ ;  $S$  - площадь витка.

При равномерном вращении витка с угловой скоростью  $\omega$  угол равен  $\alpha = \omega t + \alpha_0$  поэтому электродвижущая сила, создаваемая одним витком, может быть выражена при помощи следующего выражения:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} = \Phi_0 \sin (\omega t + \alpha_0) = E_0 \sin (\omega t + \alpha_0)$$

Если используется не один замкнутый виток, а  $N$  витков, то амплитуда электродвижущей силы  $E_0$  будет в  $N$  раз больше.

Известно, что величина энергии, содержащейся в потоке движущегося воздуха, пропорциональна кубу скорости ветра. Однако не вся энергия воздушного потока может быть использована даже с помощью идеального устройства. Теоретически, коэффициент полезного использования энергии, содержащейся в воздушном потоке, может достигать значения до 59,3 %. Однако, на практике, согласно опубликованным данным, максимальный коэффициент полезного использования энергии ветра в реальном ветроагрегате равен приблизительно 50 %. Более того, и этот показатель достигается не при всех скоростях ветра, а только при его оптимальной скорости. Также нужно учесть, что часть энергии воздушного потока теряется при преобразовании механической энергии в электрическую, которое осуществляется с КПД обычно 75–95 %. Учитывая все эти факторы, удельная электрическая мощность, выдаваемая реальным ветроэнергетическим агрегатом, видимо, составляет 30-40 % мощности воздушного потока. Однако иногда ветер имеет скорость, выходящую за пределы расчетных скоростей. Скорость ветра бывает настолько низкой, что ветроагрегат совсем не может работать, или настолько высокой, что ветроагрегат необходимо остановить и принять меры по его защите от

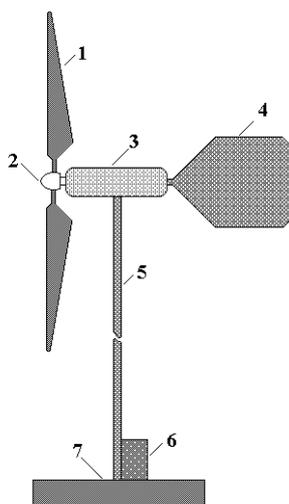
разрушения. Если скорость ветра превышает номинальную рабочую скорость, часть извлекаемой механической энергии ветра не используется, с тем чтобы не превышать номинальной электрической мощности генератора. Учитывая эти факторы, удельная выработка электрической энергии в течение года, видимо, составляет 15–30% энергии ветра, или даже меньше, в зависимости от местоположения и параметров ветроагрегата.

Основным элементом конструкции ветрогенератора является ветровое колесо. В настоящее время разработано много различных вариантов ветровых колес, с различными конфигурациями лопастей.



**Рис. 3.9. Существующие варианты ветровых колес ветрогенераторов**

Это двух, трехлопастные, многолопастные. Сами лопасти различаются по геометрии своей поверхности. На рисунке 3.9. показаны некоторые, из применяемых в настоящее время, ветровых колес.



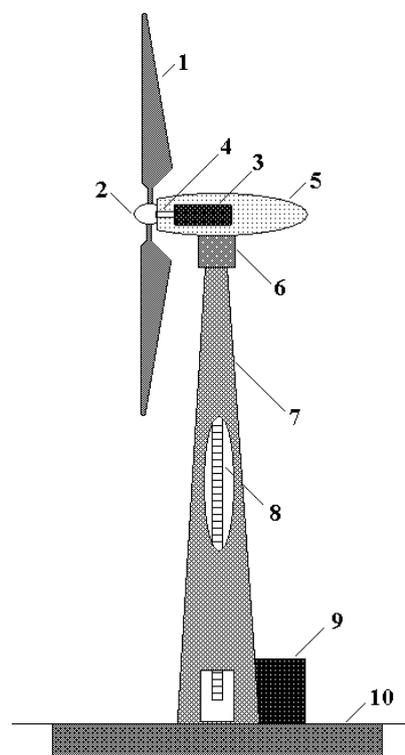
**Рис. 4.9. Устройство  
типичного  
ветроэлектрического  
генератора**

На рисунке 4.9. показана конструкция типичного ветроэлектрического генератора. Здесь: 1 – лопасти; 2 – колпак ротора; 3 – гондола с электрическим генератором; 4 – стабилизатор, служащий для отслеживания направления ветра; 5 – несущая мачта; 6 – силовой шкаф с аккумуляторными батареями и преобразователем; 7 – фундамент. Экспериментальные данные показали, что ветроэнергетическая установка, расположенная на площадке, где среднегодовая удельная мощность воздушного потока составляет около  $500 \text{ Вт/м}^2$  (скорость воздушного потока при этом равна  $7 \text{ м/с}$ ), может преобразовать в электроэнергию около 175 из этих  $500 \text{ Вт/м}^2$ .

Новейшие исследования направлены преимущественно на получение электрической энергии из энергии ветра. Стремление освоить производство ветроэнергетических машин привело к появлению на свет множества таких агрегатов. Некоторые из них достигают десятков метров в высоту, и, как полагают, со временем они могли-бы образовать настоящую электрическую сеть.

На рисунке 5.9. схематически показана ветроэлектрическая установка, построенная Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) в штате Огайо. Здесь: 1 – лопасти ветрового колеса; 2 – колпак ротора; 3 – электрический генератор; 4 – трансмиссия; 5 – гондола; 6 – поворотный механизм; 7 – башня; 8 – лестница; 9 – силовой шкаф; 10 – фундамент. На башне высотой 30,5 м генератор в поворотном обтекаемом корпусе; на валу генератора укреплен установлен пропеллер с двумя алюминиевыми лопастями длиной 19 м и весом 900 кг. Вся установка начинает работать при скорости ветра больших 13 км/ч, а максимально хорошей производительности (100 кВт) достигает при скорости ветра 29 км/ч. При этом, максимальная скорость вращения лопастей пропеллера составляет около 40 об/мин. При создании таких установок самая трудная проблема состоит в том, чтобы при разной силе ветра обеспечить одинаковое число оборотов пропеллера. Ведь при подключении к сети генератор должен давать не просто какую-то электрическую энергию, а только переменный ток с заданной частотой, т. е. со стандартной частотой 60 Гц. Поэтому угол наклона лопастей по отношению к ветру регулируют за счет поворота их вокруг продольной оси: при сильном ветре этот угол острее, воздушный поток свободнее обтекает лопасти и отдает им меньшую часть своей энергии. Помимо регулирования лопастей весь генератор автоматически поворачивается на мачте против ветра.

Существует так же много различных типов маломощных ветрогенераторов. Рассмотрим некоторые из них. Так, например, фирма Forgen производит два типа маломощных ветрогенератора Forgen 500 и Forgen 1000 с вертикальными осями вращения. Они имеют ветроколеса барабанного типа - турбины, которые обладают большим пусковым моментом, что существенно для районов, где скорость ветра много дней в году не превышает 3-5 м/с. При резких изменениях скорости ветра они довольно стабильно держат постоянные обороты. Ветроколеса барабанного типа – тихоходные, что весьма ограничивает их применение. КПД у них низкий (около 10%). Причина тихоходности в том, что максимальная скорость в крайних точках лопастей турбины – это скорость набегающего потока воздуха и не более. Главное преимущество таких ветрогенераторов –

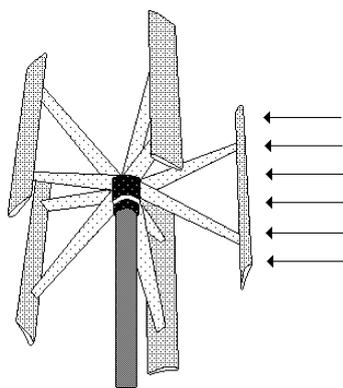


**Рис. 5.9. Ветроэлектрическая установка, построенная Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства в штате Огайо**

это отсутствия хвостового стабилизатора. Они работают при любом направлении ветра. Ветрогенераторы Forgen 500 и Forgen 1000 предназначены для работы в сети постоянного тока с напряжением 12 В или 24 В. Максимальная выходная мощность Forgen 500 составляет 10 Вт. Он может устанавливаться на маломерных судах. Максимальная выходная мощность ветрогенератора Forgen 1000 - 30 Вт. Ветрогенератор Forgen 500 при скорости ветра 15 узлов может производить в среднем до 12 ампер-часов электроэнергии в сутки, а Forgen 1000 при тех же условиях – до 24 ампер-часов, в зависимости от ветра и состояния батареи. Конструкция ветрогенераторов Forgen такова, что при экстремальной силе ветра саморегулируется скорость вращения турбины.

В похожей установке, VAWT применены лопасти имеющие формы самолётного крыла. Лопасти изготовлены из усиленной пластмассы с добавлением стекловолокна и эпоксидной смолы. Конструкция этого ветрогенератора показана на рисунке 6.9. Ветрогенератор Wind Rotor Mini Vertical. Его производит компания Ropatec (Италия). Он так же имеет турбину с вертикальной осью вращения, диаметр ротора которой 1,5 м.

Лопасти турбины имеют профиль самолетного крыла. Вес ротора 160 кг. Выходное напряжение генератора 120 В. Выходная мощность, при скорости ветра 10 м/с, составляет 280 Вт, а при скорости ветра 14 м/с – 750 Вт.

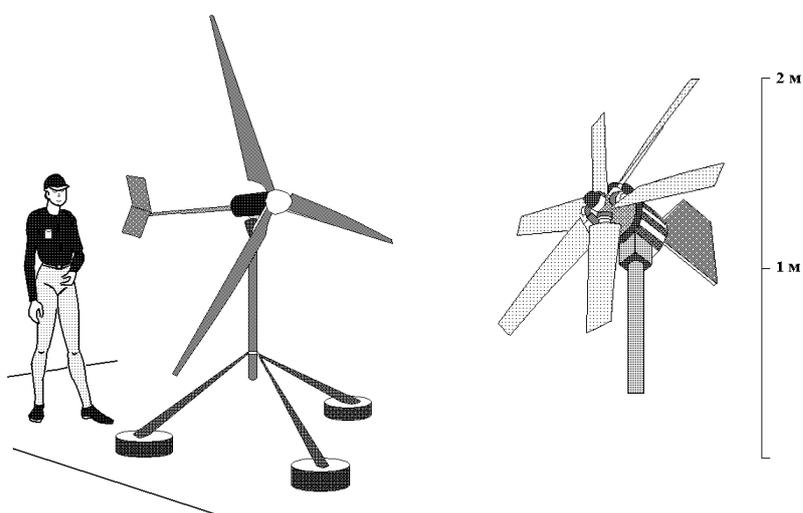


**Рис. 6.9. Ветрогенератор с вертикальной осью вращения**

Поэтому отнести его к маломощным ветрогенераторам можно только условно. Пусковая скорость этого ветрогенератора составляет 3 м/с, а максимальная скорость ветра не ограничена. Такой ветрогенератор может использоваться для стационарного электропитания небольшого дома или автономного электропитания удаленных объектов. Основные преимущества ветрогенераторов с вертикальной осью вращения лопастей: профиль лопасти типа самолетного крыла позволяет при небольшом диаметре более эффективно использовать ветрогенератор на низких скоростях ветра;

"ловит" ветер с любого направления без механических приспособлений. Такие генераторы можно устанавливать на плоские крыши т.к. лопасти всегда выше генератора. Ветрогенератор «Пчела» ВЭУ-015 от ООО «Энергетика и климат» предназначен для обеспечения электроэнергией объектов с малым энергопотреблением. Производитель рекомендует применять ее в полевых лагерях, на пасеках, яхтах и т.п. «Пчела» очень удобна для питания автономных объектов, таких, как ретрансляторы, маяки, метеостанции, рекламные щиты, различные системы контроля и наблюдения, сбора и передачи данных и т.п. Масса ВЭУ-015 «Пчела» в сборе 9 кг. Пятилопастный винт (ветроколесо, турбина) этого

ветрогенератора имеет диаметр 1,2 м, а его вынос от оси мачты всего 20 см, при полной длине ветроустановки 1,5 м. «Пчела» имеет тихоходный генератор на постоянных магнитах без обмотки возбуждения, который приводится непосредственно турбиной (ветроколесом). Отсутствие мультипликатора и системы возбуждения генератора обеспечивает высокий ресурс этой ветроустановки. Номинальная мощность ВЭУ-015 составляет 150 Вт, при номинальной частоте вращения 800 об/мин. Номинальное выходное напряжение генератора 12 В, а его ЭДС может достигать 60 В (при макс. оборотах). Расчетная скорость ветра 8 м/с. ВЭУ-015 «Пчела» нормально функционирует в широком диапазоне скоростей ветра без регулирования турбины. Стартовая скорость ветра 3 м/с, а максимальная эксплуатационная скорость для «Пчелы» – 45 м/с. Для сравнения различных типов и размеров, выпускаемых ветрогенераторов на рисунке 7.9. показаны два различных мини ветрогенератора.



**Рис. 7.9. Различные типы мини ветрогенераторов**

Следует отметить, что ветроэнергетические установки наиболее эффективны в небольших, удаленных поселениях, для энергопотребителей, отдаленных от централизованных систем энергоснабжения. Для них энергия ветра и Солнца является самым экономичным и доступным источником электричества. Характерен в этом отношении пример Дании, расположенной на многочисленных островах, которые трудно объединить централизованной энергосистемой. Сегодня здесь насчитывается свыше 5 тысяч ветроустановок, на которые приходится около 8% всей вырабатываемой в стране электроэнергии. При этом, в начале 1990 годов 1 кВт ч электроэнергии стоил одну шведскую крону, в настоящее время ее стоимость стала почти в 4 раза дешевле. Это значительно меньше аналогичного показателя для АЭС и угольных ТЭС, и даже для дешевой шведской гидроэнергии. Датские ветроустановки пользуются большим спросом – свыше половины мирового спроса на них удовлетворяется датскими фирмами.

При использовании энергии ветра возникает проблема: избыток энергии в ветреную погоду и недостаток ее в периоды безветрия. Возникает проблема накапливания и сохранения энергии. Простейший способ состоит в том, что ветрогенератор запускает насос, который накачивает воду в расположенный выше резервуар, а потом вода, стекая из него, приводит в действие водяную турбину и генератор постоянного или переменного тока. Существуют и другие способы. Один из таких способов – использование аккумуляторных батарей–аккумуляторов. Это гальванические элементы, в которых химическое вещество накапливается на электродах в результате электролиза, а затем расходуется при отборе тока.

В настоящее время наибольшее распространение получил свинцовый (или кислотный) аккумулятор. В простейшем виде кислотный аккумулятор состоит из двух свинцовых электродов, находящихся в растворе серной кислоты. В результате взаимодействия свинца с серной кислотой, на электродах образуется сернокислый свинец ( $PbSO_4$ ) и раствор серной кислоты насыщается этой солью. При зарядке аккумулятора на его электроде, соединенным с положительным полюсом источника тока, свинец окисляется в перекись  $PbO_2$ , а второй электрод превращается в чистый свинец. При разрядке аккумулятора его положительный электрод раскисляется и на нем вновь образуется  $PbSO_4$ . Электродвижущая сила свинцового аккумулятора достигает значения 2,6 В.

Также используются железо-никелевые (или щелочные) аккумуляторы. Такие аккумуляторы имеют один электрод из железа, а другой – из никеля. В качестве электролита, в таких аккумуляторах используется раствор едкого калия (KOH). Электродвижущая сила щелочного аккумулятора достигает значения 1,4 В.

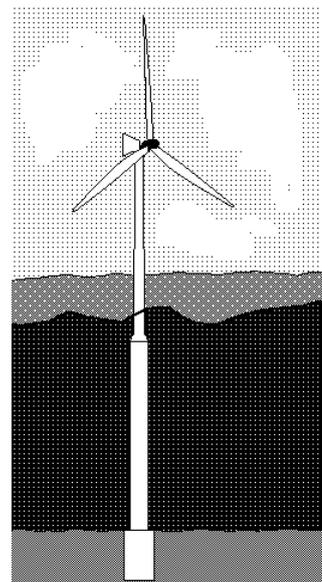
В последнее время были разработаны никель-водородные аккумуляторы. Эти аккумуляторы представляет собой герметичный щелочной аккумулятор, сочетающий в себе традиционный оксидно-никелевый электрод и газовый водородный электрод. Электролитом в никель-водородном аккумуляторе является раствор гидроксида калия (KOH). При заряде на водородном электроде выделяется водород, который накапливается в свободном объеме аккумулятора, повышая его внутреннее давление. Причем, это давление прямо пропорционально сообщенной зарядной емкости. При разряде водород электрокаталитически ионизируется на водородном электроде и давление снижается. Следует отметить, что за счет сложности процесса изготовления таких аккумуляторных батарей и их высокой стоимости, никель-водородные аккумуляторы, в основном предназначены для использования в космических аппаратах. Были предложены и такие методы аккумуляирования как раскручивание гигантских маховиков или нагнетания сжатого воздуха в подземные пещеры и вплоть до производства водорода в качестве топлива. Особенно перспективным представляется последний способ. Электрический ток от ветроагрегата разлагает воду на кислород и

водород. Водород можно хранить в сжиженном виде и сжигать в топках тепловых электростанций по мере надобности. Американский ученый Уильям Херонимус считает, что производить водород за счет энергии ветра лучше всего на море. С этой целью он предлагает установить у берега высокие мачты с ветродвигателями диаметром 60 м и генераторами. 13 тысяч таких установок могли бы разместиться вдоль побережья Новой Англии (северо-восток США) и «ловить» преобладающие восточные ветры. Некоторые агрегаты будут закреплены на дне мелкого моря, другие будут плавать на его поверхности. Постоянный ток от ветроэлектрических генераторов будет питать расположенные на дне электролизные установки, откуда водород будет по подводному трубопроводу подаваться на сушу. Один из возможных вариантов такой станции приведен на рисунке 8.9.

Недостатки ветрогенераторов. Один из самых серьезных недостатков – малая вырабатываемая мощности средних и малых ветровых генераторов. Что касается недостатков мощных ветровых генераторов и комплексов вертоэлектростанций можно сказать следующее. Общеизвестно, что водохранилище ГЭС изменяет климат в прилегающей местности, а тепловые электростанции, выбрасывая двуокись углерода, влияет на глобальный климат. Но теперь появились данные о том, что и крупные ветроэлектростанции, состоящие из сотен ветряков, могут оказывать небольшое, но реальное влияние на климат окрестностей.

Высота современных ветродвигателей – до 100 метров, размах лопастей – до 50 метров, и проектируются еще более крупные установки.

Компьютерное моделирование, проведенное в университете Дьюка (США), показало, что большие группы ветряков могут увеличить скорость ветра у земли в среднем на 0,6 метра в секунду и повысить температуру воздуха на 0,7 градуса Цельсия. Испарение влаги из почвы при этом увеличится вокруг ветроэлектростанции на 0,3 миллиметра в сутки. Все эти данные усреднены на 24 часа, а ранним утром изменения будут больше: скорость ветра за несколько часов вырастет на 1,5 метра в секунду, а температура – на 2 градуса Цельсия. Еще одним из недостатков использования ветровых генераторов являются сильные вибрации их несущих частей, которые передаются в грунт. Значительная часть звуковой энергии приходится на инфразвуковой диапазон, для которого характерно отрицательное воздействие на организм человека и многих животных. Наконец, ветровая энергетика требует больших площадей для размещения установок. Поэтому системы ветровых установок стараются



**Рис. 8.9.**  
**Ветрогенератор,**  
**установленный на**  
**морском дне**

размещать в безлюдной местности, что в свою очередь удорожает стоимость передачи энергии.

В нашей Республике, в соответствии с постановлением главы государства "О Программе мер по реализации важнейших проектов по модернизации, техническому и технологическому перевооружению производства на 2009–2014 годы" от 12 марта 2009 года в базовой отрасли реализуются десятки инвестиционных проектов. Они направлены на дальнейшее развитие энергетического потенциала страны, модернизацию, техническое и технологическое перевооружение предприятий, внедрение ресурсосберегающих технологий, развитие альтернативных источников энергии. В частности, этой программой в 2010 году предусмотрено строительство первой в Узбекистане опытной ветровой энергетической установки мощностью 750 кВт, в районе Чарвакского водохранилища. Выбор места обусловлен тем, что среднегодовые скорости ветра в этом регионе составляют 4,3 метра в секунду, а в зимний период этот показатель достигает 6,6 – 7,1 метра в секунду, что обеспечит устойчивую работу ветровой энергоустановки.

По данным Узгидромета, скорости ветра 4 и более метра в секунду, обеспечивающие эффективную работу ветроустановок, наблюдаются в Республике Каракалпакстан, Навоийской, Бухарской, Ташкентской и Кашкадарьинской областях. В перспективных районах главной энергетической компанией Узбекистана предусмотрено строительство парка ветровых энергоустановок.

Применение альтернативных источников энергии позволяет обеспечить экономию органического топлива, улучшить экологическую ситуацию в регионах, решить вопрос энергоснабжения в труднодоступных местах.

Практические меры по сокращению энергоемкости производства, несомненно, самым позитивным образом скажутся на развитии топливно-энергетического сектора страны, который в последние годы уверенно выходит на мировой рынок энергоресурсов.

### **Контрольные вопросы**

Чем вызвана потребность использования энергии ветра?

На каком принципе основано преобразование энергии ветра в электрическую энергию?

Какой элемент является основным элементом конструкции ветрогенератора?

В каких местах наиболее эффективно применение ветроэнергетических установок?

Какие существуют способы накопления и сохранения энергии, выработанной ветрогенератором?

В чем заключается один из самых серьезных недостатков

ветрогенераторов?

Какие работы, по использования энергии ветра, ведутся в нашей Республике?

Какие районы нашей Республики наиболее перспективны, с точки зрения использования ветровой энергетики?

## Лекция 10. Солнечная энергетика.

Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция на Солнце. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,2 - 0,3$  мкм. При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется, в основном за счет поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения – озоном и рассеяния излучения молекулами газов и находящимися в воздухе частицами пыли и аэрозолями. Параметром, отражающим влияние атмосферы на интенсивность и спектральный состав солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, является атмосферная масса (АМ). При нулевой воздушной массе АМ 0 у верхней границы атмосферы интенсивность излучения равна  $E_C = 1360$  Вт м<sup>2</sup>.

Величина АМ 1 соответствует прохождению солнечного излучения через безоблачную атмосферу до уровня моря при зенитальном расположении Солнца. Воздушная масса для любого уровня земной поверхности в любой момент дня определяется по формуле

$$AM(P) = \frac{P}{P_0 \sin \theta} \quad (1.10)$$

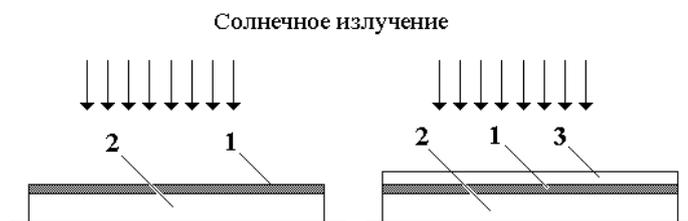
Здесь:  $P$  – атмосферное давление, Па;  $P_0$  – нормальное атмосферное давление ( $1,013 \cdot 10^5$  Па);  $\theta$  – угол высоты Солнца над горизонтом. Наиболее характерной в земных условиях является величина АМ 1,5 ( $\theta = 41^\circ 49'$ ). Она принята за стандартную при интегральной поверхностной плотности солнечного излучения  $E_C = 835$  Вт м<sup>2</sup>. Энергия фотонов, в излучении с длиной волны  $\lambda$ , определяется из следующего выражения:

$$hv = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda} \quad (2.10)$$

Здесь:  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны излучения.

На солнце предметы нагреваются в результате поглощения ими энергии солнечного излучения. Это общеизвестное явление используется в устройствах для теплового преобразования энергии. Такие, достаточно

простые устройства, называются коллекторы или приемники солнечного излучения. В качестве прера нарисунке 1.10. показаны простейшие коллекторы солнечного излучения. Здесь: 1– пластина коллектора; 2– изолирующее основание; 3– прозрачное покрытие.



**Рис. 1.10. Простейшие коллекторы солнечного излучения**

Если обозначить интенсивность солнечного излучения через  $E$ , а поглощательную способность пластины для этого вида радиации, обозначить через  $\alpha_c$ . То мажно показать, что под действием солнечного излучения пластина нагревается до тех пор, пока не достигнет равновесной температуры  $T$ . При такой температуре интенсивность падающего и испускаемого излучения равны:

$$\alpha_c E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.10)$$

Здесь:  $\varepsilon$  – излучательная способность пластины при низких температурах. Тогда равновесную температуру –  $T$  можно определить из уравнения

$$T^4 = \frac{\alpha_c E}{\varepsilon \sigma} \quad (4.10)$$

Из приведенного уравнения видно, что равновесная температура тем выше, чем больше отношение  $\alpha_c/\varepsilon$ .

Важным фактором, влияющим на собиране солнечной энергии, является длинноволновое излучение, приходящее из атмосферы. Оно испускается главным образом молекулами углекислого газа и водяного пара при поглощении ими прямого солнечного излучения, а также излучения, отраженного от земли и обусловленного конвекцией. Спектры поглощения этих молекул, обусловленные их колебательным и вращательным движениями, лежат в видимой и в инфракрасной областях спектра. Общая интенсивность  $P_a$  этого излучения существенно зависит от содержания в атмосфере водяного пара, особенно вблизи земной поверхности. При повышенной влажности и сплошной облачности атмосфера ведет себя примерно так же, как черное тело с температурой около 280 К (10° С); соответствующая интенсивность излучения на горизонтальной поверхности составляет около 300 Вт/м<sup>2</sup>. Общая же интенсивность атмосферного излучения редко падает ниже 100 Вт/м<sup>2</sup>. Для собирана этого излучения применяют так называемые селективные поглотители. Обычно такой поглотитель представляет собой

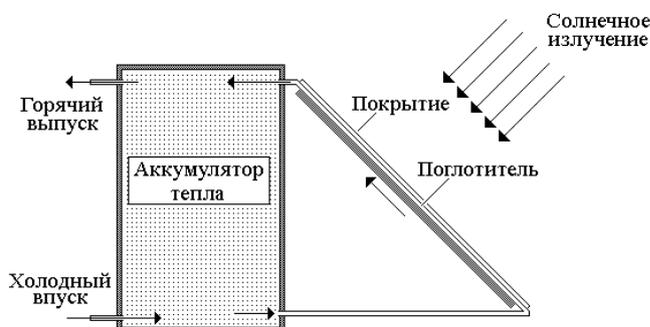
полированную металлическую поверхность, покрытую тонкой темного цвета защитной пленкой окисей никеля или меди. Его поглощательная способность в коротковолновой области довольно высока, порядка 0,9. При очень тонком покрытии подобный поглотитель прозрачен для излучения с длиной волны, превышающей его толщину. Тогда его излучательная способность в длинноволновой части спектра должна быть не выше, чем у металла, то есть около 0,1. Равновесная температура такого селективного поглотителя с величиной отношения  $\alpha/\epsilon$ , близкой к 9, в рассмотренных ранее условиях должна повыситься до 427 К, или 154<sup>0</sup>С (если интенсивность длинноволнового атмосферного излучения составляет 200 Вт/м<sup>2</sup>, а поглощательная способность к этому виду излучения равна 0,1). Однако добиться такого существенного улучшения практически очень сложно. Основная трудность заключается в том, что большинство селективных покрытий очень чувствительно к пылевому загрязнению, и в естественных условиях их характеристики со временем быстро ухудшаются.

Кроме обычных плоских коллекторов существуют и другие конструкции солнечных коллекторов, например солнечный бассейн. В таком устройстве поглотителем служит непосредственно водный бассейн, который при необходимости можно оборудовать любым покрытием. Под воздействием солнечной радиации температура воды повышается как за счет непосредственного поглощения водой фотонов энергии, так и за счет теплообмена между поглощающим излучение днищем бассейна и водой. При нагревании вода расширяется и нагретые более легкие слои поднимаются вверх. Было обнаружено, что в некоторых природных водоемах самые нагретые слои воды оказываются скорее на дне, чем на поверхности. Как предполагают, это явление обусловлено высоким содержанием соли в таких водоемах и температура изменяется с глубиной бассейна так же, как и концентрация соли, которая у поверхности воды оказывается ниже, чем у дна. Результаты экспериментов показали, что равновесная температура в подобных бассейнах может достигать 100° С.

Процесс поглощения солнечной радиации осуществляется здесь отчасти в толще воды, а отчасти у дна бассейна. Он сопровождается сложным перераспределением энергии между различными слоями жидкости за счет теплопроводности и излучения. Вследствие этого характеристики излучения бассейна определяются его поглощающими свойствами. Для простоты можно считать, что такой бассейн подобен плоскому коллектору. Солнечные бассейны имеют ряд преимуществ перед коллекторами других типов. Это наиболее дешевые приемники больших количеств солнечной энергии; благодаря высокой теплоемкости воды они обладают широкими возможностями сохранения внутренней энергии, и, несмотря на различные технические трудности, солнечные бассейны находят все большее применение.

Солнечная энергия используется также для нужд отопления и нагрева воды. Следует отметить, что использование солнечной энергии для отопления и горячего водоснабжения является одним из наиболее распространенных способов ее применения. Системы горячего водоснабжения на основе плоского солнечного коллектора уже сейчас получили широкое распространение в Израиле и Японии, а на юге США и даже в Европе действуют довольно большие экспериментальные установки для отопления домов и нагрева воды в плавательных бассейнах. На рисунке 2.6. показана схема солнечного водонагревателя. Находясь в тесном контакте с поглотителем коллектора, вода нагревается и при помощи насоса или естественной циркуляции отводится от него. Затем нагретая вода поступает в хранилище, откуда ее можно расходовать по необходимости.

В солнечном нагревателе, изображенном на рисунке 2.10., основным



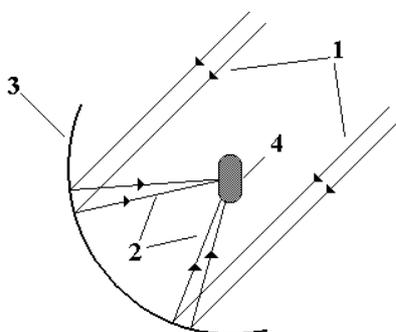
**Рис. 2.10. Солнечный нагреватель**

теплообменником является поглотитель. Вода здесь либо непосредственно омывает тыльную часть – пластины поглотителя, либо проходит через систему труб, являющихся частью этой пластины.

При условии хорошего теплообмена между окружающей средой и пластинами (это характерно для нагревания воды), температуры поглотителя и воды становятся одинаковы.

Поскольку вода нагревается при прохождении через коллектор, очевидно, что на входе поглотитель холоднее, нежели на выходе. Перепад температуры зависит как от удельной теплоемкости жидкости, так и ее скорости. Полезная мощность такого нагревателя зависит от мощности поступающего на него солнечного излучения, поэтому необходимо, прежде всего, выбрать наилучшую ориентацию коллектора. В принципе любой коллектор с помощью специального механизма можно было бы все время ориентировать на солнце, но это довольно дорогой способ. Поэтому в настоящее время используются неподвижные коллекторы, у которых меняется только угол наклона. Оптимальный угол наклона для наибольшего выхода энергии зависит от широты, например для средних широт составляет  $\approx 50 - 65^\circ$ . Дальнейшего повышения равновесной температуры поглотителя и, следовательно, повышения его эффективности, можно добиться, если с помощью зеркал

сфокусировать на нем энергию солнечного излучения. На рисунке 3.10. показано устройство параболического концентратора, фокусирующего солнечную энергию. На этом рисунке: 1– падающие солнечные лучи; 2– отраженные солнечные лучи; 3 – параболический концентратор; 4 – поглотитель (нагреваемое тело). В фокусе такого концентратора можно получить равновесную температуру равную  $1600 - 1700^{\circ}\text{C}$ . Получению более высокой температуры препятствует непараллельность отраженных солнечных лучей. В результате этой непараллельности энергия отраженных солнечных лучей собирается не точно в фокусе концентратора, а в некоторой области вокруг него. Следовательно, для получения максимального количества энергии облучаемое тело должно быть достаточно большим, чтобы принять все лучи, отраженные от концентратора.



**Рис. 3.10. Устройство параболического концентратора**

Кроме того, с ухудшением оптических свойств зеркальной поверхности концентратора и с увеличением размеров приемника солнечной энергии уменьшается и равновесная температура.

В ряде стран солнечную энергию используют в опреснительных установках для получения питьевой воды из засоленных источников. На рисунке 4.10. показана схема одного из простых устройств, предназначенного для опреснения воды. Предназначенная для опреснения вода (2) набирается в емкость (3), расположенную в нижней части теплоизоляционного устройства (1), где она нагревается за счет поглощения солнечной энергии. Поверхность этой емкости обычно чернят, так как вода почти беспрепятственно пропускает коротковолновую часть солнечного излучения (в некоторых установках воду подкрашивают в черный цвет, и она становится поглотителем). С повышением температуры движение молекул воды становится более интенсивным и часть из них покидает поверхность воды. Насыщенный водяными парами воздушный поток (4) поднимается вверх, где охлаждается, соприкасаясь с поверхностью прозрачного покрытия, пары воды частично конденсируются, а образовавшиеся капли (5) стекают по ней вниз, собираясь в емкости для опресненной воды (6), для последующего ее

использования (7). Охлажденный воздух вновь опускается к поверхности воды, замыкая цикл конвективного движения. Для повышения эффективности системы, необходимо, чтобы в процессе конденсации на поверхности покрытия образовывалась водная пленка. Так как при конденсации воды в виде капель, значительная часть падающей на поверхность покрытия солнечной

радиации, отражается ими; даже при сравнительно больших, углах наклона поверхности, когда вода довольно быстро стекает, примерно половина всей поверхности покрытия занята каплями воды. На тщательно очищенной от следов жира стеклянной поверхности обычно образуется пленка воды, тогда как почти на всех, даже более чистых пластмассовых поверхностях сконденсированная вода выпадает в виде капель. На некоторых новых пластических материалах возможна пленочная конденсация воды.

Производительность такой солнечной опреснительной установки меняется в течение дня в соответствии с изменением интенсивности солнечной радиации, поступающей на установку. При использовании очень мелкой емкости, скорость получения опресненной воды в любой момент времени зависит только от величины солнечной радиации. При использовании глубокой емкости, необходимая температура воды устанавливается лишь через несколько дней, и в дальнейшем опресненную воду можно получать непрерывно на протяжении суток. Однако, для этого необходимо, чтобы количество воды в таком резервуаре во много раз превышало дневную производительность установки, например  $100 \text{ кг/м}^2$  при глубине около 10 см.

Одним из основных недостатков таких опреснительных установок является сезонное изменение их производительности.

Для решения ряда специальных задач возникает необходимость строительства достаточно крупногабаритных, площадью более  $1000 \text{ м}^2$  солнечных концентраторов. Таких экспериментальных солнечных концентраторов, мощностью от 5 кВт до нескольких МВт, насчитывается в настоящее время в мире около десятка. Самыми крупными в настоящее время концентраторами с тепловой мощностью 1000 кВт являются солнечные печи в Одейо (Французские Пиренеи) и в Паркенте (Узбекистан) – Большая Солнечная Печь (БСП). БСП позволяет формировать в фокальной зоне лучистый стационарный поток вплоть до  $1000 \text{ Вт/см}^2$  с помощью зеркально концентрирующих систем концентратора миделью отражающей поверхности  $1840 \text{ м}^2$  и 62 гелиостатов с общей отражающей поверхностью  $3022,5 \text{ м}^2$  в режиме непрерывного слежения за Солнцем с точностью 3 угловых минуты. В отличие от Французской печи на базе Большой Солнечной Печи (Узбекистан, Паркент) создана специальная

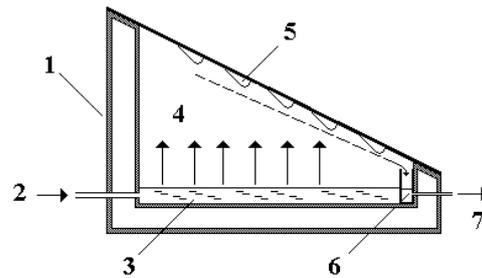


Рис. 4.10. Схема установки для опреснения воды

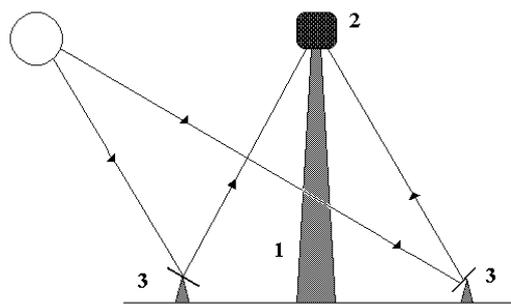
технологическая линия по переработке синтезированных в ней материалов для использования в керамическом производстве и предусмотрена автоматизированная система управления технологическими процессами. Разработана технология синтеза керамических материалов с наперед заданными свойствами методом радиационного нагрева на Большой Солнечной Печи. В результате исследования процессов взаимодействия концентрированного светового потока с веществом выявлен механизм формирования нанодисперсных частиц в поле концентрированного светового излучения, что является основой создания технологии получения нанопорошков на Большой Солнечной Печи. Развитие данного направления может привести к новым методам в гелиоматериаловедении, целью которого является создание новых оксидных и композиционных материалов с наперед заданным комплексом физико-химических свойств с использованием концентрированной солнечной энергии.

В дополнение к прямому использованию солнечного тепла, в регионах с высоким уровнем солнечной радиации ее можно использовать для получения пара, который вращает турбину и вырабатывает электроэнергию. Производство солнечной тепловой электроэнергии в крупных масштабах достаточно хорошо отработано. К 2009 году энергокомпаниями США уже установлено более 400 мегаватт солнечных тепловых электростанций, которые обеспечивают электричеством 350 000 человек и замещают эквивалент 2,3 млн. баррелей нефти в год. Девять электростанций, расположенных в пустыне Мохаве (в американском штате Калифорния) имеют 354 МВт установленной мощности и накопили 100 лет опыта промышленной эксплуатации. Эта технология является настолько развитой, что, по официальным сведениям, может соперничать с традиционными электрогенерирующими технологиями во многих районах США. В других регионах мира также скоро должны быть начаты проекты по использованию солнечного тепла для выработки электроэнергии. Индия, Египет, Марокко и Мексика разрабатывают соответствующие программы. По способу производства тепла солнечные тепловые электростанции подразделяют на солнечные концентраторы (зеркала) и солнечные пруды. Рассмотрим некоторые особенности солнечных концентраторов. Такие электростанции концентрируют солнечную энергию при помощи линз и рефлекторов. Большие зеркала концентрируют солнечные лучи до такой степени, что вода превращается в пар, выделяя при этом достаточно энергии для того, чтобы вращать турбину.

На острове Сицилия еще в начале 80-х годов дала ток солнечная электростанция мощностью 1 МВт. Принцип ее работы - башенный.

Башенный принцип построения солнечных электростанций показан на рисунке 5.10. Нагреваемый приемник – 2 располагается на высокой башне – 1, (отсюда и название башенный), солнечное излучение концентрируется, при помощи зеркальных отражателей – 3 на

телопоглощающей поверхности котла, в котором образуется пар. Образованный пар поступает на паровую турбину и далее на электрогенератор. В солнечной электростанции, построенной в Сицилии, зеркала фокусируют солнечные лучи на приемнике, расположенном на высоте 50 метров. Приемник вырабатывает пар с температурой превышающей 500°С, который приводит в действие традиционную турбину. При переменной облачности недостаток солнечной энергии компенсируется паровым аккумулятором.



**Рис. 5.10. Принцип работы солнечной электростанции башенного типа**

Солнечная электростанция, установленная в Альмерии на юге Испании, имеет несколько другой принцип работы. Здесь, сфокусированное на вершину башни солнечное тепло, приводит в движение натриевый круговорот (как в атомных реакторах на быстрых нейтронах), а тот уже нагревает воду до образования пара. У такого варианта ряд преимуществ. Натриевый аккумулятор тепла обеспечивает не только непрерывную работу электростанции, но дает возможность частично накапливать избыточную энергию для работы в пасмурную погоду и ночью. Мощность испанской станции всего 0,5 МВт. Принцип нагревания сжатого воздуха используется в солнечной электростанции, разработанной в Германии. Ее мощность – 20 МВт. Здесь используются подвижные зеркала по 40 м<sup>2</sup> каждое, управляемые микропроцессором, которые расположены вокруг 200 – метровой башни. Эти зеркала фокусируют солнечное излучение на нагреватель, где помещается сжатый воздух. Сжатый воздух нагревается до 800°С и приводит в действие две газовые турбины. Затем теплом этого же отработавшего воздуха нагревается вода, и в действие вступает уже паровая турбина. Получаются как бы две ступени выработки электричества. В результате КПД станции поднят до 18%, что существенно больше, чем у других гелиоустановок. Аналогичный принцип используется в солнечной электростанции, расположенной вблизи Керчи.

Мощность этой станции – 5 МВт. Конструкция станции следующая. Вокруг башни концентрическими окружностями размещены 1600 зеркал,

направляющих солнечных лучи на паровой котел, который установлен на башне 70-метровой высоты. Зеркала площадью  $25 \text{ м}^2$  каждое, с помощью автоматики следят за Солнцем и отражают солнечную энергию точно на поверхность котла, обеспечивая ее плотностью потока в 150 раз большую, чем дает Солнце на поверхности Земли. В котле при давлении 40 атмосфер генерируется пар с температурой  $250^\circ\text{C}$ , поступающий на паровую турбину. В специальных емкостях-аккумуляторах под давлением содержится вода, накапливающая тепло для работы по ночам и в пасмурную погоду. Благодаря этим аккумуляторам станция может работать еще 3–4 часа после захода Солнца, а на половинной мощности – около полусуток.

Фирма "Luz Corp." установила огромные поля таких зеркал в калифорнийской пустыне. Они производят 354 МВт электроэнергии. Эти системы могут превращать солнечную энергию в электричество с КПД около 15 %.

Следует отметить, что мощность башенных солнечных электростанций во многом определяется высотой самой башни. При этом, чем выше башня, тем больше отбираемая мощность. При достаточно высоких башнях исключается эффект взаимного затенения отражающих зеркал. Для получения мощности в 50–100 МВт необходима башня высотой 200–300 метров, с площадью отражающих зеркал в 2–3  $\text{км}^2$ .

К недостаткам существующих солнечных тепловых электростанций относятся следующие факторы: низкая плотность потока энергии, суточная и сезонная цикличность, сильная зависимость от погодных условий, требование больших земельных площадей под размещение отражающих зеркал.

### **Контрольные вопросы**

Что является источником энергии солнечного излучения?

Чем вызвана потребность использования солнечной энергии?

Как устроены простейшие коллекторы солнечного излучения?

Как устроены солнечные нагреватели?

Каков принцип работы солнечной электростанции башенного типа?

Какая солнечная установка расположена в Паркенте (Узбекистан)?

Что относится к недостаткам существующих солнечных тепловых электростанций?

Что относится к достоинствам и к преимуществам солнечных тепловых электростанций?

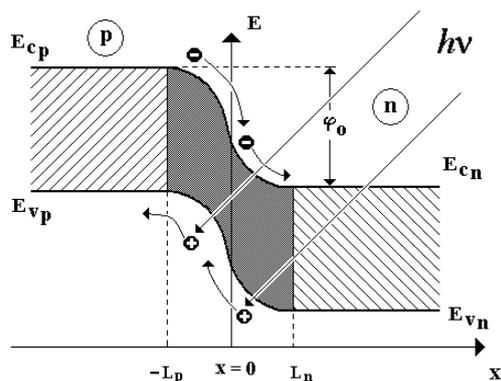
## Лекция 11. Фотоэлектрические преобразователи.

Устройства для непосредственного преобразования солнечной энергии в электроэнергию называются фотопреобразователи. Преобразование солнечного света в электричество происходит в солнечных элементах, изготовленных из полупроводникового материала, например, кремния, которые под воздействием солнечного света вырабатывают электрический ток. Соединяя эти элементы в батареи, можно строить крупные фотоэлектрические станции. Крупнейшая такая станция на сегодняшний день – это 5-мегаваттная установка Карриса Плейн в американском штате Калифорния. КПД фотоэлектрических установок в настоящее время составляет около 17– 20%. Солнечные фотоэлектрические системы просты в обращении и не имеют движущихся механизмов, однако сами фотоэлементы содержат сложные полупроводниковые устройства, аналогичные используемым для производства интегральных схем. В основе действия солнечных элементов лежит физический принцип, при котором электрический ток возникает под воздействием света между двумя полупроводниками с различными типами проводимости.

Солнечный элемент изготавливается на основе пластины, выполненной из полупроводникового материала, содержащего области с р- и n- типами проводимости, т.е. содержащей р-n переход.

Рассмотрим р-n переход образованный при контакте двух полупроводников электронного и дырочного типов проводимости. Пусть концентрация донорной примеси в n области равна –  $N_d$ , а концентрация акцепторной примеси в р области равна –  $N_a$ . При этом концентрация свободных электронов в n области равна  $n_n$ , а концентрация свободных дырок в р области равна  $p_p$ . Примем, что переход находится при достаточно высокой температуре, значит вся примесь в обеих областях полностью ионизирована, и выполняется условие  $N_d = n_n$  и  $N_a = p_p$ . Энергетическая зонная диаграмма такого перехода приведена на рисунке (1.11) Здесь  $E_{c_p}$  и  $E_{c_n}$  – дно зоны проводимости в р и n областях перехода;  $E_{v_p}$  и  $E_{v_n}$  – потолок валентной зоны в р и n областях соответственно. Потенциальный барьер  $\varphi_0$  между р и n областями, обусловленный диффузионным потенциалом,

$$\varphi_0 = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0} (n_n L_n^2 + p_p L_p^2) \quad (1.11)$$



**Рис. 1.11. Энергетическая диаграмма p-n перехода**

p и n областей p-n перехода. Толщина области локализации этого электрического поля ограничена расстоянием от  $L_p$  до  $L_n$ . При равновесных условиях, в отсутствие освещения p-n перехода, поток термически генерированных носителей заряда.

При освещении p-n перехода, в следствии поглощении света в полупроводнике дополнительно возбуждаются электронно-дырочные пары. В областях электрической нейтральности ( $x < L_p$  и  $x > L_n$ ) фотовозбуждение увеличивает только энергию электронов и дырок, не разделяя их в пространстве. В области локализации электрического поля фотогенерированные носители заряда пространственно разделяются этим полем. В результате разделения фотогенерированных носителей заряда, полупроводник p-типа получает избыточный положительный заряд, а полупроводник n-типа получает избыточный отрицательный заряд. Между n- и p-областями p-n перехода возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов получила название – фото ЭДС. Полярность фотоЭДС соответствует «прямому» смещению p-n перехода, которое понижает высоту потенциального барьера и способствует инжекции дырок из p-области в n-область и электронов из n-области в p-область. В результате действия этих двух противоположных механизмов – генерация носителей заряда под действием света и их оттока из-за понижения высоты потенциального барьера – при разной интенсивности света устанавливается разная величина фотоЭДС. При этом величина фотоЭДС возрастает пропорционально логарифму интенсивности света. При коротком замыкании освещенного p-n перехода в электрической цепи потечет ток, пропорциональный величине интенсивности освещения.

Граничная длина волны, начиная с которой фотоны будут поглощаться в материале полупроводникового солнечного элемента с шириной запрещенной зоны  $E_g$ , различна для разных материалов.

приводит к формированию объемных зарядов –  $qN_a$ , толщиной  $L_p$  в p-области и  $qN_d$ , толщиной  $L_n$ , в n-области перехода (Рис. 1.9). При этом, если концентрации электронов и дырок в обеих областях p-n перехода равны, т.е.  $p_p = n_n$ , то  $L_p = L_n$ . Наличие объемных зарядов различных знаков, в свою очередь приводит к возникновению контактного электрического поля. Это электрическое поле локализовано на границе раздела

$$\lambda = \frac{1,24}{E_g} \quad (1.11)$$

Более длинноволновое излучение не поглощается в полупроводнике и, следовательно, бесполезно с точки зрения фотоэлектрического преобразования.

Солнечный элемент изготавливается на основе пластины, выполненной из полупроводникового материала, например кремния. Для формирования р-п перехода в пластине создаются области с различными типами проводимости. Для сбора фотогенерированных носителей заряда на обеих поверхностях пластины изготавливаются токосъемные металлические омические контакты. Верхний (фронтальный) контакт выполняется в виде гребенчатой полосковой или концентрической структуры, нижний контакт - сплошной. На рисунке 2.11. показано устройство простейшего солнечного элемента. Здесь: 1 – омические контакты; 2 – область проводимости n- типа; 3 – область проводимости р- типа.



Рис. 2.11. Устройство простейшего солнечного элемента

На рисунке 3.11. показаны простейшие солнечные элементы с различной конфигурацией фронтального контакта. На этом рисунке: 2 – область полупроводниковой пластины n- типа проводимости; 1 – омические контакты; 3 – область полупроводниковой пластины р- типа проводимости. Кристаллический кремний не единственный полупроводниковый материал для изготовления солнечных элементов.

Аморфный кремний выступил в качестве более дешевой альтернативы моно кристаллическому. Первые СЭ на его основе были созданы в 1975 году.

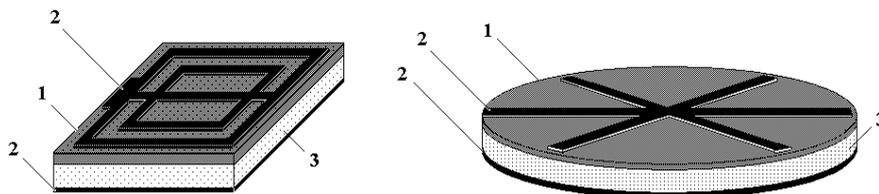


Рис. 3.11. Солнечные элементы различной конфигурации

Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического. Поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки a-Si:H толщиной 0,5 – 1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых 300 – мкм подложек. Кроме того, благодаря существующим технологиям получения тонких пленок аморфного кремния большой

площади не требуется операции резки, шлифовки и полировки, необходимых для СЭ на основе монокристаллического кремния. По сравнению с поликристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе a-Si:H производят при более низких температурах (300°C): можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сократит расход кремния в 20 раз.

Пока максимальный КПД экспериментальных элементов на основе a-Si:H -14% – несколько ниже КПД кристаллических кремниевых СЭ (~18%). Однако не исключено, что с развитием технологии КПД элементов на основе a-Si:H достигнет теоретического потолка – 16 %.

Арсенид галлия – один из наиболее перспективных материалов для создания высокоэффективных солнечных батарей. Это объясняется следующими его особенностями:

- почти идеальная для однопереходных солнечных элементов ширина запрещенной зоны 1,43 эВ;
- повышенная способность к поглощению солнечного излучения: требуется слой толщиной всего в несколько микрон;
- высокая радиационная стойкость, совместно с высокой эффективностью, делают этот материал чрезвычайно привлекательным для использования в космических аппаратах;
- относительная нечувствительность к нагреву батарей на основе GaAs;
- характеристики сплавов GaAs с алюминием, мышьяком, фосфором или индием дополняют характеристики GaAs, что расширяет возможности при проектировании солнечных элементов.

Главное достоинство арсенида галлия и сплавов на его основе - широкий диапазон возможностей для дизайна СЭ. Фотоэлемент на основе GaAs может состоять из нескольких слоев различного состава. Это позволяет разработчику с большой точностью управлять генерацией носителей заряда, что в кремниевых солнечных элементах ограничено допустимым уровнем легирования. Типичный солнечный элемент на основе GaAs состоит из очень тонкого слоя AlGaAs в качестве окна. Основным недостатком арсенида галлия – высокая стоимость. Для удешевления производства предлагается формировать СЭ на более дешевых подложках; выращивать слои GaAs на удаляемых подложках или подложках многократного использования.

Создание солнечных элементов на основе гетеро-структур AlGaAs-GaAs открыло новую страницу солнечной фотоэнергетики. В гетероструктурах удалось сформировать без дефектную гетерограницу и обеспечить идеальные условия для фотогенерации электронно-дырочных пар и их собирания р-n-переходом. Поскольку гетерофотоэлементы с арсенид-галлиевой фотоактивной областью оказались еще и более радиационно-стойкими, они быстро нашли применение в космической технике, несмотря на значительно более высокую стоимость по сравнению с кремниевыми фотоэлементами.

Это так же было обусловлено применением нового эпитаксиального метода выращивания гетероструктур – газофазной эпитаксии из паров металлорганических соединений (МОС ГФЭ).

Фоточувствительные структуры, изготовленные таким методом, имеют рекордное значение КПД = 27.6% в условиях освещения концентрированным солнечным светом.

Так же следует отметить интенсивное развитие каскадных (многопереходных) солнечных элементов. На основе германиевых подложек, используя метод МОС ГФЭ, формируются многослойные согласованные по периоду решетки структуры, в которых верхний фотоэлемент имел *p-n*-переход в твердом растворе  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ , а нижний фотоэлемент – в  $\text{GaAs}$ . Последовательное соединение фотоэлементов осуществлялось посредством туннельного *p-n*-перехода, специально формируемого между каскадами. В дальнейшем к процессу фотоэлектрического преобразования был подключен и третий каскад с *p-n*-переходом в германиевой подложке. На рисунке 4.11. показана структура такого многокаскадного фотоэлемента. На этом рисунке: 1–фронтальные контакты; 2 –просветляющее покрытие; 3 – первый каскад фотоэлемента; 4– первый туннельный *p-n*-переход; 5 – второй каскад фотоэлемента; 6 – второй туннельный *p-n*-переход; 7– третий каскад фотоэлемента; 8– тыльный контакт. В настоящее время трехкаскадные фотоэлементы, обладающие КПД около 28% уже используются для энергообеспечения космических аппаратов.

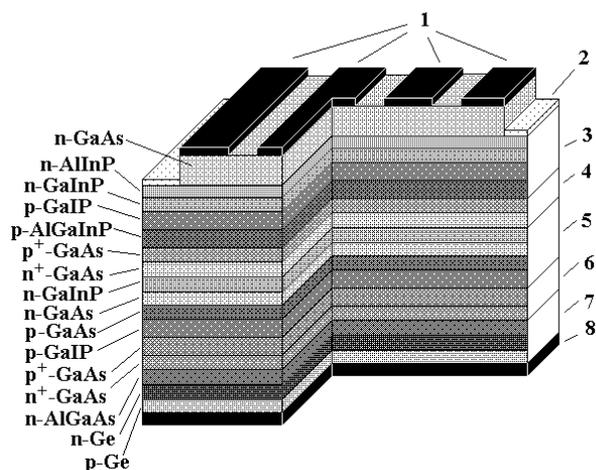


Рис. 4.11. Многокаскадный фотоэлемент

Предложены и совершенно новые подходы, связанные с использованием материалов с квантовыми точками. В частности, речь идет о создании фотоактивной среды с „промежуточной зоной“. В структурах многокаскадных фотоэлементов, кроме использования вновь созданных материалов с заданным спектром поглощения, вероятно, можно было бы улучшить характеристики коммутирующих туннельных диодов (увеличить

пиковый ток) путем введения между  $n^+$ - и  $p^+$ - слоями сверхрешеток из вертикально связанных квантовых точек.

Поликристаллические тонкие пленки также весьма перспективны для солнечной энергетики. Чрезвычайно высока способность к поглощению солнечного излучения у диселенида меди и индия ( $\text{CuInSe}_2$ ) – 99 % света поглощается в первом микроне этого материала (ширина запрещенной зоны – 1,0 эВ). Наиболее распространенным материалом для изготовления окна солнечной батареи на основе  $\text{CuInSe}_2$  является  $\text{CdS}$ . Иногда для улучшения прозрачности окна в сульфид кадмия добавляют цинк. Немного галлия в слое  $\text{CuInSe}_2$  увеличивает ширину запрещенной зоны, что приводит к росту напряжения холостого хода и, следовательно, повышению эффективности устройства.

Теллурид кадмия ( $\text{CdTe}$ ) – еще один перспективный материал для фотовольтаики. У него почти идеальная ширина запрещенной зоны (1,44 эВ) и очень высокая способность к поглощению излучения. Пленки  $\text{CdTe}$  достаточно дешевы в изготовлении. Кроме того, технологически несложно получать разнообразные сплавы  $\text{CdTe}$  с  $\text{Zn}$ ,  $\text{Hg}$  и другими элементами для создания слоев с заданными свойствами.

Подобно  $\text{CuInSe}_2$ , наилучшие элементы на основе  $\text{CdTe}$  включают гетеропереход с  $\text{CdS}$  в качестве оконного слоя. Оксид олова используется как прозрачный контакт и просветляющее покрытие. Серьезная проблема на пути применения  $\text{CdTe}$  - высокое сопротивление слоя  $p\text{-CdTe}$ , что приводит к большим внутренним потерям. Но она решена в  $p\text{-i-n}$ -структуре с гетеро переходом  $\text{CdTe/ZnTe}$ . Пленки  $\text{CdTe}$  обладают высокой подвижностью носителей заряда, а солнечные элементы на их основе – высокими значениями КПД, от 10 до 16%.

Среди солнечных элементов особое место занимают батареи, изготовленные на основе органических материалов. Коэффициент полезного действия солнечных элементов на основе диоксида титана, покрытого органическим красителем, весьма высок – ~12 %. Основа солнечных элементов данного типа – широкозонный полупроводник, обычно  $\text{TiO}_2$  покрытый монослоем органического красителя. Принцип работы элемента основан на фотовозбуждении красителя и быстрой инжекции электрона в зону проводимости  $\text{TiO}_2$ . При этом молекула красителя окисляется, через элемент идет электрический ток и на платиновом электроде происходит восстановление трииодида до иодида. Затем иодид проходит через электролит к фотоэлектроду, где восстанавливает окисленный краситель.

### **Контрольные вопросы**

Как называются устройства для непосредственного преобразования солнечной энергии в электроэнергию?

Что называют - солнечным элементом?

Что является основой солнечного элемента?

Какие полупроводниковые материалы используются при изготовлении солнечных элементов?

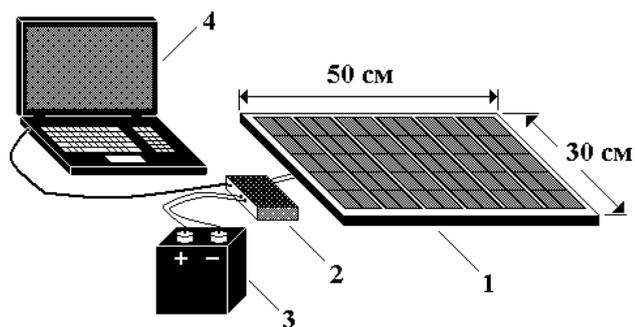
В чем преимущества каскадных солнечных элементов?

Что называют солнечными элементами основе органических материалов?

## **Лекция 12. Солнечные батареи.**

Солнечная батарея состоит из отдельных солнечных элементов, которые соединяются последовательно и параллельно для того, чтобы увеличить выходные значения тока и напряжения. При последовательном соединении элементов увеличивается выходное напряжение, при параллельном соединении увеличивается выходной ток. Для того, чтобы увеличить и ток, и напряжение комбинируют два этих способа соединения. Кроме того, при таком способе соединения выход из строя одного из солнечных элементов не приводит к выходу из строя всей цепочки, т.е. повышает надежность работы всей батареи. Таким образом, солнечная батарея состоит из параллельно-последовательно соединенных солнечных элементов. Величина максимально возможного тока, отдаваемого батареей прямо пропорциональна числу параллельно включенных элементов, а величина выходного напряжения пропорциональна числу последовательно включенных элементов. Так комбинируя типы соединения, собирают батарею с требуемыми параметрами.

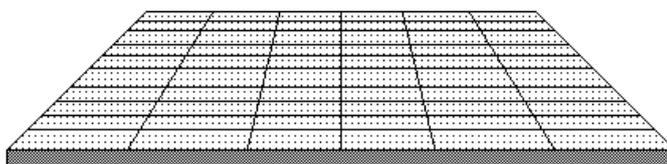
Конструктивно солнечная батарея представляет собой плоскую панель, состоящую из размещенных на ней фотоэлементов и электрических соединений, защищенную с лицевой стороны прозрачным твердым покрытием. Число фотоэлементов в батарее может быть различным, от нескольких десятков до нескольких тысяч. Площадь панели у больших промышленных солнечных батарей может достигать тысячи квадратных метров, а максимальная генерируемая мощность – десятков киловатт. В качестве примера на рисунке 1.12. показан пример использования солнечной батареи на основе коисталлического кремния. На этом рисунке: 1 – панель солнечной батареи; 2 – коммутатор; 3 – аккумулятор; 4 – потребитель. Солнечная батарея, при нормальном солнечном освещении, генерирует мощность 20– 25 Вт, при напряжении 13 Вольт, что вполне достаточно для питания, например, переносного компьютера.



**Рис. 1.12. Пример использования солнечной батареи малой мощности**

В более мощных солнечных батареях, например в батареях фирмы RZMP, использованы фотоэлектрические элементы изготовленные на основе мульткристаллического полупроводникового кремния, имеющие просветляющее покрытие нитрид кремния и серебряные контактные полосы – токосъемный контакт. Солнечные фотоэлектрический модуль представляет собой целую плиту из алюминиевого профиля, в которой между двумя слоями герметизирующей пленки заключены фотопреобразователи последовательно соединенные между собой медной шиной. Прозрачной изоляцией служит высокопрочное закаленное стекло. На внутренней стороне солнечного модуля установлена распределительная коробка с диодным блоком внутри (для минимизации потерь мощности при затемнении) с выведенными в нее контактами.

Внешний вид солнечной батареи типа RZMP-220 показан на рисунке 2.12. Такая солнечная батарея имеет следующие характеристики: геометрические размеры – 1642x948x34 мм; максимальная мощность – 200 Вт; ток короткого замыкания – 7,5 А; напряжение холостого хода – 35,7 В.

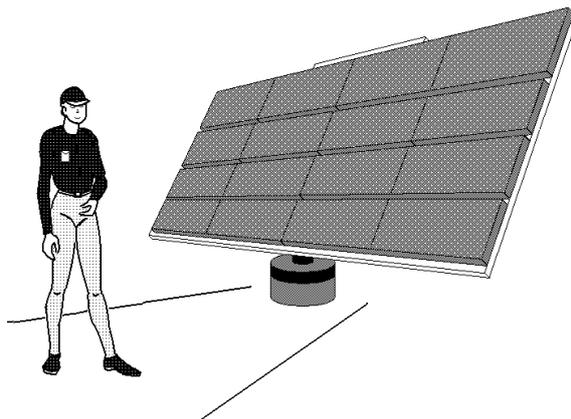


**Рис. 2.12. Внешний вид солнечной батареи типа RZMP-220**

Солнечные батареи обеспечивают большую автономность и независимость от линий электропередач. Солнечное электричество имеет много преимуществ: – это чистый, тихий и надежный источник энергии, особенно в удаленных районах, где нет централизованного электроснабжения. Фотоэлектрические системы на протяжении всего срока эксплуатации генерируют значительно больше энергии, чем было затрачено при их производстве. В солнечных странах, подобных Испании, солнечные батареи за 2 года возвращают энергию, потраченную на их

производство, а служат примерно 25 лет. В качестве примера можно привести данные, о солнечной батарее, изготовленной из фотоэлектрических элементов на основе кристаллического кремния, установленной на одном из ранчо в штате Техас. Эта солнечная батарея, установленная на не подвижном основании, при нормальном освещении генерирует мощность около 6 кВт.

Однако, в настоящее время, главное применение солнечные батареи нашли в космонавтике, где они занимают основное место среди других источников автономного энергоснабжения. Солнечные батареи снабжают электроэнергией аппаратуру спутников и системы жизнеобеспечения



**Рис. 3.12. Солнечная батарея мощностью 6кВт.**

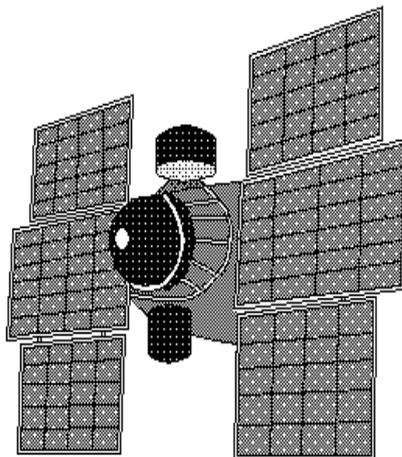
космических кораблей и станций, а также заряжают электрохимические аккумуляторы, используемые на теневых участках орбиты.

На международной космической станции (МКС) солнечные батареи имеют следующее устройство: две гибкие складные панели солнечных батарей образуют так называемое крыло солнечной батареи, всего на ферменных конструкциях станции размещено четыре пары таких крыльев. Каждое такое крыло имеет длину 35 м и ширину 11,6 м, а его полезная площадь составляет 298 м<sup>2</sup>. Вырабатываемая, каждым таким крылом, суммарная мощность достигает 32,8 кВт. Солнечные батареи генерируют постоянное напряжение от 115 до 173 Вольт, которое затем, с помощью специальных преобразователей, трансформируется в стабилизированное, постоянное напряжение, величиной 124 Вольта. Это стабилизированное напряжение непосредственно используется для питания электрооборудования станции. Станция совершает один оборот вокруг Земли за 90 минут и примерно половину этого времени она проводит в тени Земли, где солнечные батареи не работают. Тогда её электроснабжение происходит от буферных никель-водородных аккумуляторных батарей, которые подзаряжаются, когда МКС снова выходит на солнечный свет.

В качестве примера использования солнечных батарей на космических аппаратах на рисунке 4.12. показан внешний вид спутника и

панели солнечных батарей на спутнике «Космос-242». Здесь использовались фото чувствительные элементы изготовленные на основе кристаллического кремния. Общая площадь солнечных батарей на этом спутнике составляла примерно  $52 \text{ м}^2$ , что позволяло генерировать мощность около 5 кВт.

На рисунке 5.12. а, б. приведен общий вид и панели солнечных батарей установленных на космических станциях «Союз» и «Мир». На станции «Мир» площадь солнечных батарей составляла 114 квадратных метров, и они давали 10.1 киловатт мощности. С целью наиболее оптимального использования солнечного излучения, для получения

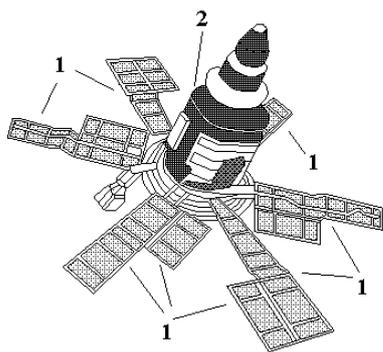


**Рис. 4.12. Солнечная батарея,  
установленная на спутнике  
«Космос-242»**

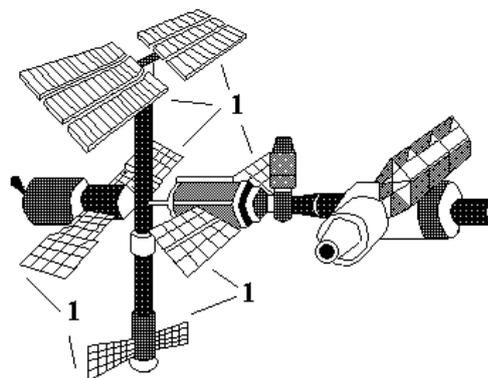
максимальной отдачи мощности, солнечные батареи постоянно разворачивались, при помощи электрических моторов, перпендикулярно направлению падающего на них света. Практически во всех современных системах космических станций солнечные батареи закреплены подвижно, чтобы позволить им разворачиваться, не разворачивая всего космического корабля.

В перспективе, альтернативой кремниевым солнечным батареям могут стать полимерные солнечные батареи. Это новая технология, над развитием которой работают десятки научно - исследовательских институтов и фирм по всему миру. Полимерный фотоэлемент – это пленка, которая состоит из активного слоя (полимера), электродов из алюминия, гибкой органической подложки и защитного слоя. Для создания рулонных полимерных солнечных батарей отдельные пленочные фотоэлементы объединяют между собой. Достоинства полимерных солнечных батарей по сравнению с обычными - кристаллическими: компактность, легкость, гибкость. Такие батареи недороги в производстве (для их изготовления не используется дорогой кремний) и экологичны, так как они оказывают на окружающую среду менее значительное влияние. Недостаток пока один – эффективность преобразования солнечной энергии полимерных солнечных

батарей пока очень низкая. Этот недостаток и ограничивал создание таких батарей на уровне образцов – прототипов. Первые полимерные батареи в



**Рис. 5.12.а. Внешний вид космической станции «Союз».**  
**1-солнечные батареи;**  
**2- корпус станции**



**Рис. 5.12.б. Внешний вид космической станции «Мир».**  
**1-солнечные батареи**

промышленных масштабах начали выпускать в Дании. Эти солнечные батареи имеет КПД в 6,5% при освещённости в 0,2 ватта на квадратный сантиметр. Это самый высокий уровень, достигнутый для солнечных батарей из органических материалов. И хотя лучшие кремниевые солнечные батареи имеют КПД 40%, тем не менее, к полимерным батареям во всем мире проявляют очень сильный интерес. Правда технология производства таких батарей находится пока еще в ранней стадии своего развития. Совсем недавно датская компания «Mecorprint A/S» запустила первую линию, на которой будут производиться полимерные солнечные батареи. Компания около 10 лет занималась проектно-конструкторскими работами и вот теперь готова к массовому выпуску таких батарей. Производство заключается в многослойной печати солнечного фотоэлемента на гибкую пленку, которую затем можно скручивать, разрезать и делать из пленки солнечные батареи абсолютно любых размеров.

### **Контрольные вопросы**

Какое устройство называются солнечной батареей?

Что, конструктивно, представляет собой солнечная батарея?

Что такое – полимерный фотоэлемент?

В чем заключается основное преимущество солнечные батареи, по сравнению с другими источниками электрической энергии?

### Лекция 13. Космические солнечные станции.

Получать и использовать всю солнечную энергию на поверхности Земли в значительной степени мешает атмосфера: при прохождении через атмосферу часть солнечной энергии поглощается, а часть рассеивается. Наиболее целесообразно разместить солнечные энергостанции в космосе, на около земной орбите. Там не будет атмосферных помех, а невесомость позволит создавать многокилометровые конструкции, которые необходимы для «сбора» энергии солнца.

В первые, идея создания солнечной космической электростанции была предложена еще в 1968 г. Она заключалась в следующем. Размещение на искусственном спутнике Земли эффективные солнечные батареи, преобразующих радиацию в электрический ток; выбрать

оптимальную геостационарную орбиту, обеспечивающую в течение всего года постоянную освещенность панелей и «зависание» станции над определенным местом Земли; преобразование тока в СВЧ-излучение и передача его направленным пучком на наземную приемную антенну.

Достоинства СКЭС очевидны: увеличение плотности потока солнечной радиации, рассеивание фонового тепла в космос (исключается опасность теплового перегрева Земли), отсутствие контакта с земной природой. В некоторых проектах предлагалось с помощью системы крупных зеркал, размещенных на космической станции, превращать солнечный свет в тепло, кипятить рабочую жидкость и ее паром вращать турбины с электрогенераторами. Но и в таком варианте процесс получения энергии остается очень долгим: солнечный свет через тепло и механическое движение превращается в электричество, потом снова в электромагнитные волны для передачи на Землю, а затем, опять превращается в электричество. Каждый этап ведет к потерям энергии; приемные антенны на Земле должны занимать огромные площади. Но хуже всего то, что СВЧ-луч негативно влияет и на ионосферу Земли, и на живые организмы. Существует несколько предложений и теоретических разработок по передаче выработанной энергии по лазерному лучу. На первый взгляд лазерный луч идеально подходит для передачи энергии на расстояние: он дает когерентный, почти не расходящийся пучок света с большой плотностью энергии, что облегчает прием луча и его преобразование в электричество. Однако, именно высокая концентрация энергии делает эту технологию

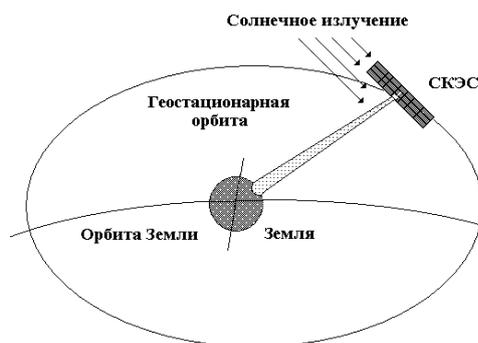


Рис. 1.13. Принципиальная схема СКЭС

небезопасной. Расстояние от геостационарной орбиты до поверхности Земли - 36 тысяч километров, и даже идеально сформированный луч, пройдя такое расстояние, будет иметь диаметр освещаемой поверхности в 100-200 метров. Нагревать эту поверхность он будет в десятки раз сильнее полуденного Солнца. Это может негативно сказаться на животном мире. Более того, для эффективного преобразования энергии лазерного луча в электрическую энергию, соответствующие приемники - преобразователи.

Не так давно японские инженеры добились преобразования солнечного света в лазерное излучение с КПД – 42%. Существуют и приемники с неплохим КПД, превращающие лазерный свет в электричество. Но, эффективные передатчики и приемники работают в разных спектральных диапазонах и совместно применяться не могут. Так же не возможно использовать лазерную передачу энергии в пасмурную погоду. Однако работы в этом направлении ведутся весьма интенсивно. Например, в японском Университете Кинки смогли 20 минут питать лазером двигатель мотодельтаплана с размахом крыла около метра. Аналогичные работы проводились и в NASA.

Другой возможный способ доставки энергии на Землю – это радиоволны сверхвысоких частот в диапазоне от 2,45 до 5,8 ГГц. Они почти не поглощаются атмосферой, не отражаются ионосферой и вдобавок эффективно преобразуются в электричество. Эффективность преобразования, в этом случае, достигается за счет использования ректенны. От английских слов *rectifying antenna* (выпрямляющая антенна). К обычной дипольной антенне размером несколько сантиметров (порядка длины волны излучения) подключают быстродействующий диод Шоттки. Множество таких антенн собирают в решетку, покрывающую достаточно большую площадь, и соединяют между собой, чтобы суммировать выработанный в них электрический ток.

Ректенна, рассчитанна на сильный сигнал. Каждая проходящая электромагнитная волна с силой толкает электроны в диполе то в одну, то в другую сторону. Однако диод обладает различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока и позволяет току, который возникает под воздействием СВЧ-излучения, идти только в одну сторону. Получается пульсирующий постоянный ток, причем в него переходит большая часть принимаемой энергии сверхвысоко частотного излучения.

Еще в 1964 году американский физик Уильям Браун на телеканале CBS демонстрировал модель вертолета снабженного такой ректенной. Энергию, этот вертолет, получал от микроволнового излучателя на Земле, и ее хватало, чтобы держать аппарат в воздухе. Позднее, занимаясь проектом солнечныхкосмических электростанций в Лаборатории реактивного движения NASA, Браун смог передать 30 кВт на расстояние в одну милю с КПД 84%. Это очень хороший результат.

Кроме чисто технической задачи, связанной с КПД фотоприемников и необходимостью развертывания в космосе многокилометровых солнечных

панелей, осталась неясной проблема сжатия пучка излучения, который на расстоянии 36 тыс. км (радиус геостационарной орбиты) должен иметь поперечный размер не больше 10 км (предельный размер наземной антенны). Угол расходимости пучка, как легко подсчитать, не должен превышать 1'.

Несмотря на заманчивость и простоту идеи, столь серьезные технические трудности быстро преодолеть невозможно. Однако уже начинается практическая реализация таких проектов. Американская энергетическая компания Pacific Gas & Electric намерена заключить контракт на поставки солнечной энергии из космоса в энергосеть. Небольшая компания Solaren, созданная опытными специалистами по аэрокосмическим технологиям, обещает с 2016 г. на 15 последующих лет обеспечить подачу в энергосети штата Калифорния порядка 1000 ГВт·ч электроэнергии в год. Получать ее планируется на орбитальной солнечной электростанции, а передавать на Землю микроволновым лучом.

Группа японских корпораций во главе с Mitsubishi планирует построить первую в мире орбитальную солнечную электростанцию в рамках проекта Solarbird. В соответствии с проектом, электростанция должна содержать 40 искусственных спутников, оснащенных солнечными батареями. Выработанное ими электричество будет доставляться на поверхность планеты бесконтактным способом при помощи электромагнитных волн сверх высокочастотного диапазона. Принимать сигнал будет огромное “зеркало” диаметром около 3 км, которое разместят в пустынном районе океана.

Преимущество орбитальной солнечной электростанции заключается в ее независимости от погодных условий. При мощности в 1 млн кВт подобная станция способна работать в 10 раз эффективнее, чем наземная. Ожидается, что первый испытательный спутник будет запущен в 2016 году. Окончание строительства намечено на 2025 г. Официальным руководителем проекта считается компания Mitsubishi Heavy Industries, но в самих исследованиях помимо двух учредителей занято еще 16 японских промышленных и научных компаний. Первейшей задачей энергетиков признано создание до 2013 года новой технологии, которая позволит беспроводным способом передавать электричество из космоса на планету. Как говорят исследователи, теоретически передавать его на Землю можно было бы при помощи микроволн, однако как это сделать на практике, пока не ясно. Космическая электростанция на основе фотоэлектрических панелей может быть очень значимым альтернативным источником энергии, когда ресурсы сжигаемого топлива будут истощены. Компании считают, что новая технология позволит разместить на орбите гигаваттную электростанцию. Для сравнения, такую же мощность имеет атомный реактор на крупнейшей в Европе Запорожской АЭС. Пока затруднительно оценить стоимость космической электроэнергии по сравнению с

традиционными источниками, однако этого гигаватта будет достаточно для энергоснабжения примерно 294 тыс. жилых домов.

Между тем по сравнению с атомными электростанциями космический генератор не будет представлять радиоактивной опасности для людей. По расчетам экспертов, для создания такого мощного генератора на орбите потребуется смонтировать массив солнечных батарей общей площадью 4 кв. км на высоте 36 тыс. км над Землей. Эксперты говорят, что в отличие от наземных солнечных батарей космические смогут генерировать ток круглосуточно без выходных дней и перерывов. Кроме того, космическим панелям не мешает плохая погода, а попадание прямых солнечных лучей позволит батареям генерировать в три–четыре раза больше электричества, чем их наземным аналогам. Кроме того, Хироши Йошида, глава токийской компании Excalibur КК, также занятой в проекте, отмечает, что наука и космические технологии не стоят на месте и к 2040 году в руках людей должны будут появиться батареи, способные генерировать в сотни раз больше электроэнергии, чем существующие панели.

По словам исследователей, в ближайшие 50 лет космический генератор вряд ли станет основным источником энергии, однако свою нишу орбитальная энергия точно займет. В первую очередь орбитальную электростанцию можно будет рассматривать как аварийный источник энергии, питающий наиболее важные объекты.

Исследования возможности создания орбитальных электростанций ведутся давно, но основными проблемами являются передача энергии со спутника на Землю и чрезмерная стоимость всей конструкции. В то же время, эффективность солнечной электростанции в космосе намного выше, чем на Земле.

Полученную в космосе энергии более целесообразно использовать в космосе же, не отправляя ее на Землю. На производство тратится около 90 % вырабатываемой на планете энергии. Основные ее потребители – металлургия, машиностроение, химическая промышленность. Они же, кстати, и главные загрязнители окружающей среды. Обойтись без таких производств человечество пока что не в состоянии. Но ведь можно убрать их с Земли. Почему бы ни использовать сырье, добываемое на Луне или астероидах, создав на спутниках и астероидах соответствующие базы? Задача, безусловно, сложнейшая, и сооружение солнечных космических электростанций – только первый шаг к ее решению. Любой вариант проекта солнечной космической электростанции предполагает, что это колоссальное сооружение и причем не одно. Даже самая маленькая СКЭС должна весить десятки тысяч тонн. И эту гигантскую массу необходимо будет запустить на отдаленную от Земли орбиту. Современные средства выведения в состоянии доставить на низкую – опорную – орбиту необходимое количество блоков, узлов и панелей солнечных батарей. Чтобы уменьшить массу огромных зеркал, концентрирующих солнечный свет, можно сделать их из тончайшей зеркальной пленки, например, в виде

надувных конструкций. Собранные фрагменты солнечной космической электрической станции нужно доставить на высокую орбиту и состыковать там.

Но Солнце не единственный космический источник энергии, которым могут воспользоваться земляне. Не исключено, что на других небесных телах есть энергоносители, по своей мощности во много раз превосходящие имеющиеся на нашей планете. В поверхностных слоях лунного грунта, например, найдены запасы гелия-3, который на Земле отсутствует. Предполагается, что получить термоядерную энергию из этого изотопа проще, чем из других. Между тем считанные килограммы гелия-3 удовлетворят годовую потребность в энергии всего человечества.

### **Контрольные вопросы**

Какое устройство космической солнечной станцией?

В чем заключаются достоинства космических солнечных станций?

Какие, в принципе, существуют способы доставки на Землю энергии, выработанной на космической станции?

Какие страны проектируют солнечные космические станции?

### **Лекция 14.**

#### **Энергия биомассы.**

Сегодня вклад биомассы в мировой энергетический баланс составляет около 15%. Первичной биомассой являются растения, произрастающие на суше и в воде. Биомасса образуется в результате фотосинтеза, за счет которого солнечная энергия аккумулируется в растущей массе растений. Энергетический КПД собственно фотосинтеза составляет около 5%. В зависимости от рода растений и климатической зоны произрастания это приводит к различной продуктивности в расчете на единицу площади, занятой растениями. Для северных зрелых, медленно растущих лесов продуктивность составляет 1 тонну прироста древесины в год на 1 гектар. Для сравнения урожай кукурузы (вся зеленая масса) в штате Айова, США в 1999 г. составил около 50 тонн на гектар.

Для энергетических целей первичная биомасса используется в основном как топливо, замещающее традиционное ископаемое топливо. Причем, как правило, это отходы лесной и деревоперерабатывающей промышленности, а также отходы полеводства (солома, сено). Теплотворность сухой древесины достаточно высока, составляя в среднем 20 ГДж/т. Несколько ниже теплотворность соломы, например, для пшеничной соломы она составляет около 17,4 ГДж/т. В то же время большое значение имеет удельный объем топлива, который определяет

размеры соответствующего оборудования и технологию сжигания. В этом отношении древесина значительно уступает, например, углю. Для угля удельный объем составляет около 30 дм<sup>3</sup>/ГДж, тогда как для щепы, в зависимости от породы дерева, этот показатель лежит в пределах 250 - 350 дм<sup>3</sup>/ГДж; для соломы удельный объем еще больше, достигая 1 м<sup>3</sup>/ГДж. Поэтому сжигание биомассы требует либо ее предварительной подготовки, либо специальных топочных устройств. В частности, в ряде стран распространение получил способ уплотнения древесных отходов с превращением их в брикеты или, так называемые, пелетки. Оба способа позволяют получить топливо с удельным объемом около 50 дм<sup>3</sup>/ГДж, что вполне приемлемо для обычного слоевого сжигания. Например, в США годовое производство пелеток составляет около 0,7 млн. т, а их рыночная цена – около 6 долл. /ГДж при теплотворности около 17 ГДж/т.

Наряду с первичной растительной биомассой значительный энергетический потенциал содержится в отходах животноводства, твердых бытовых отходах и отходах различных отраслей промышленности. Использование этого потенциала возможно термохимическими или биохимическими методами. В первом случае речь идет в основном о твердых бытовых отходах, которые либо сжигаются, либо газифицируются на мусороперерабатывающих фабриках. Во втором случае сырьем является навоз или жидкие бытовые стоки, которые перерабатываются в биогаз.

В нетрадиционной энергетике особое место занимает переработка биомассы (органических сельскохозяйственных и бытовых отходов) метановым брожением с получением биогаза, содержащего около 70% метана, и обеззараженных органических удобрений. Чрезвычайно важна утилизация биомассы в сельском хозяйстве, где на различные технологические нужды расходуется большое количество топлива и непрерывно растет потребность в высококачественных удобрениях. Всего в мире в настоящее время используется или разрабатывается около 60 разновидностей биогазовых технологий.

Биогаз – это смесь метана и углекислого газа, образующаяся в процессе анаэробного сбраживания в специальных реакторах – метантэнках, устроенных и управляемых таким образом, чтобы обеспечить максимальное выделение метана. Если говорить более конкретно, то биогаз – это смесь из 65 % метана, 30 % CO<sub>2</sub>, 1 % сероводорода и незначительных примесей азота, кислорода, водорода и угарного газа. Энергия, заключенная в 28 м<sup>3</sup> биогаза, эквивалентна энергии: 16,8 м<sup>3</sup> природного газа; 20,8 литра нефти; 18,4 литра дизельного топлива.

Энергия, получаемая при сжигании биогаза, может достигать от 60 до 90% той, которой обладает исходный материал. Метановое брожение протекает при средних (мезофильное) и высоких (термофильное) температурах. Наибольшая производительность достигается при термофильном метановом брожении.

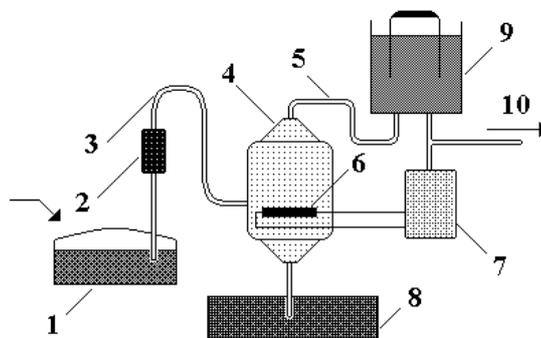
Наибольшая производительность сбраживания происходит при температуре 30–40<sup>0</sup>С (развитие мезофильной бактериальной флоры), а также при температуре 50–60<sup>0</sup>С (развитие термофильной бактериальной флоры).

При нормальной работе реактора получаемый биогаз содержит 60–70% метана, 30–40% двуокиси углерода, небольшое количество сероводорода, а также примеси водорода, аммиака и окислов азота. Наиболее эффективны реакторы, работающие в термофильном режиме при 43–52<sup>0</sup>С. При продолжительности обработки навоза 3 дня выход биогаза на таких установках составляет 4,5 л на каждый литр полезного объема реактора. В исходную массу для интенсификации процесса анаэробного сбраживания навоза и выделения биогаза добавляются органические катализаторы, которые изменяют соотношение углерода и азота в сбраживаемой массе. В качестве таких катализаторов используются глюкоза и целлюлоза.

Получение биогаза экономически оправдано и является предпочтительным при переработке постоянного потока отходов (стоки животноводческих ферм, скотобоев, растительных отходов и т. д.). Экономичность заключается в том, что нет нужды в предварительном сборе отходов, в организации и управлении их подачей; при этом известно, сколько и когда будет получено отходов. Получение биогаза, возможное в установках самых разных масштабов, особенно эффективно на агропромышленных комплексах, где существует возможность полного экологического цикла. Биогаз используют для освещения, отопления, приготовления пищи, для приведения в действие механизмов, транспорта, электрогенераторов. Подсчитано, что годовая потребность в биогазе для обогрева жилого дома составляет около 45 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> жилой площади, суточное потребление при подогреве воды для 100 голов крупного рогатого скота – 5–6 м<sup>3</sup>. Потребление биогаза при сушке сена (1 тонна) влажностью 40% равно 100 м<sup>3</sup>, 1 тонны зерна – 15 м<sup>3</sup>.

Ферментация навоза идет в анаэробных (бескислородных) условиях при температуре 30– 55 ° С (оптимально 40 °С). Длительность ферментации, обеспечивающая обеззараживание навоза, не менее 12 суток. Для анаэробной ферментации можно использовать как обычный, так и жидкий, бесподстилочный навоз, который легко подается в биореактор насосом. При ферментации в навозе полностью сохраняются азот и фосфор. Масса навоза практически не изменяется, если не считать испаряемой воды, которая переходит в биогаз. Органическое вещество навоза разлагается на 30–40 %; деструкции подвергаются в основном легко разлагаемые соединения – жир, протеин, углеводы, а основные гумусообразующие компоненты – целлюлоза и лигнин – сохраняются полностью. Получаемый биогаз плотностью 1,2 кг/м<sup>3</sup> (0,93 плотности воздуха) имеет следующий состав (%): метан – 65, углекислый газ – 34, сопутствующие газы – до 1 (в том числе сероводород – до 0,1). Содержание метана может меняться в зависимости от состава субстрата и технологии в пределах 55–75 %. Содержание воды в биогазе при 40° С – 50 г/м<sup>3</sup>; при

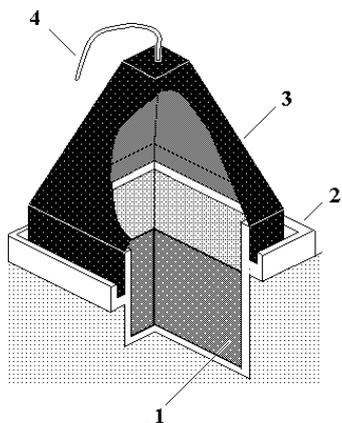
охлаждении биогаза она конденсируется, и необходимо принять меры к удалению конденсата (осушка газа, прокладка труб с нужным уклоном и пр.). Энергоемкость получаемого газа –  $23 \text{ мДж/м}^3$ , или  $5500 \text{ ккал/м}^3$ . На рисунке 1.14. приведена схема типовой промышленной установки для



**Рис. 1.14. Схема установки для получения биогаза**

получения биогаза. На этом рисунке: 1 – навозоприемник; 2 – насос; 3 – жидкий навоз; 4 – метантанк; 5 – биогаз; 6 – теплообменник; 7 – котел; 8 – хранилище удобрений; 9 – газгольдер; 10 – выход готовой продукции.

Широкое развитие простых биогазовых установок наблюдается в Китае, они активно внедряются в ряде стран Европы, Америки, Азии, Африки. В Западной Европе, например в Румынии и в Италии, более 10 лет назад начали широко использовать малогабаритные биогазовые установки с объемом перерабатываемого сырья 6–12 куб.м. Это обусловлено тем, что на территории любого фермерского хозяйства можно достаточно просто оборудовать простую биогазовую установку, которые, например, применяются в индивидуальных хозяйствах Румынии. В качестве примера, на рисунке 2.14. показано устройство наиболее простой биогазовой установки. На этом рисунке: 1 – накопительная яма (ферметатор); 2 – бетонную канавку, заполненную водой (гидрозатвор); 3 – металлический накопительный купол; 4 – патрубок для отвода биогаза.

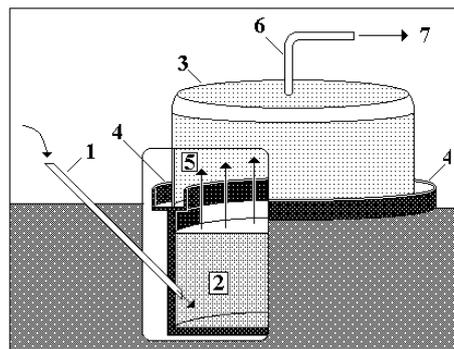


**Рис. 2.14. Устройство простой биогазовой установки**

Накопительная яма изнутри облицовывают железобетонными плитами, которые для герметичности покрывают смолой. Вокруг ямы–ферментатора, устраивают бетонную канавку – гидрозатвор, наполненную водой, в которую погружают нижний бортик накопительного купола на глубину 0,5 м. Необходимость создания такого гидрозатвора обусловлена элементами техники безопасности. При значительном повышении давления газа под куполом последний будет приподниматься в гидравлическом затворе и выпускать избыток газа.

Несколько видоизмененный вариант паростой биогазовой установки, показан на рисунке 3.14. На этом рисунке: 1 – загрузочная труба; 2 – накопительная емкость (ферментатор); 3 – стальной купол; 4 – бетонная канавка, заполненная водой (гидрозатвор); 5 – образовавшийся газ; 6 – выпускной патрубок; 7 – выход газа. Как видно из рисунка в этом варианте биогазовой установки используется яма, в которую погружается сварной резервуар из стали, служащий накопителем-ферментатором. Яму имеет диаметр 3–4 метра и глубину 2–2,5 метра. Внутреннюю поверхность сварного резервуара покрывают антикоррозионной защитой.

С наружной стороны верхней кромки резервуара из бетона устраивают кольцевую канавку глубиной до 1 м, которую заливают водой. В нее свободно устанавливается вертикальную часть купола, закрывающую резервуар. Таким образом, канавка с залитой в нее водой служит гидрозатвором. Биогаз собирается в верхней части купола, откуда через выпускной патрубок и далее по трубопроводу подается к месту его использования. В накопительную емкость загружается около 12 кубических метров органической массы (желательно свежего навоза), которая заливается жидкой фракцией навоза без добавления воды. Через неделю после заполнения ферментатор начинает генерировать газ.



**Рис. 3.14. Видоизмененный вариант биогазовой установки**

Для получения биогаза можно использовать отходы сельского хозяйства, испорченные продукты, стоки крахмалперерабатывающих предприятий, жидкие отходы сахарных заводов, бытовые отходы, сточные воды городов и спиртовых заводов. Процесс ведется при температуре около 30<sup>0</sup>С и рН 6 - 8. Этот способ получения биогаза широко применяют в Индии, Китае, Японии. В настоящее время, для производства биогаза, чаще используют вторичные отходы (отходы животноводства и сточные воды).

В последнее время в средствах массовой информации часто встречается термин – биотопливо. Биотопливо – это топливо из биологического сырья, получаемое, как правило, в результате переработки стеблей сахарного тростника или семян рапса, кукурузы, сои. Существуют также проекты разной степени проработанности, направленные на получение биотоплива из целлюлозы и различного типа органических отходов, но эти технологии находятся в ранней стадии разработки или технологической отработки. Различается жидкое биотопливо (для двигателей внутреннего сгорания, например, этанол, метанол, биодизель), твёрдое биотопливо (дрова, солома) и газообразное (биогаз, водород).

Всемирно известная компания Neste Oil представила еще один проект по производству биологического дизельного топлива из жировых отходов рыбы. Как заявляют его разработчики, использование такого вида топлива

позволит значительно сократить выбросы парниковых и выхлопных газов, которые загрязняют наши города. В настоящее время компания производит биологическое дизельное топливо на четырех заводах. Два из них находятся в Порвоо, Финляндия. Один в Сингапуре, и еще один в Роттердаме. Общая мощность всех заводов составляет около 2 миллиона тонн дизельного топлива в год. Основой для производства биологического дизельного топлива выступает жир рыбных субпродуктов, которые нельзя готовить для употребления в пищу.

### **Контрольные вопросы**

Что является первичной биомассой?

В результате каких процессов образуется биомасса?

Какие существуют методы переработки биомассы?

Что такое – биогаз?

Какие существуют методы получения биогаза?

Чем обусловлена экономическая выгода получения биогаза?

В каких странах наблюдается широкое развитие простых биогазовых установок?

Что называется – биотопливо?

### **Лекция 15.**

#### **Термоядерная энергия.**

Одним из перспективных источников энергии, по мнению большинства специалистов, является термоядерная энергия. Однако осуществить эту реакцию весьма непросто: она начнется лишь в том случае, если ядра атомов сблизятся настолько, что возникнут силы ядерного притяжения (так называемого сильного взаимодействия). Это расстояние на пять порядков меньше размеров атома, и, пока электроны остаются на своих орбитах, они не позволяют ядрам атомов сблизиться. Да и сами ядра до начала сильного взаимодействия расталкиваются кулоновскими силами.

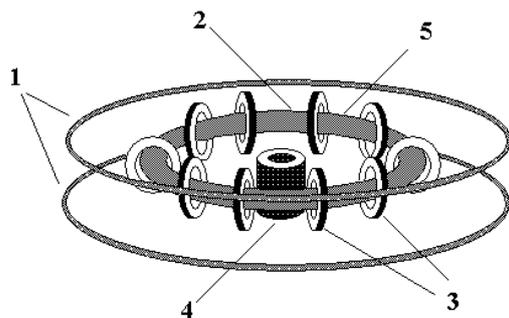
В результате ядерной реакции изменяется строение атомного ядра. Поэтому при распаде тяжелых ядер (в реакции деления) или, наоборот, при слиянии легких ядер (в реакциях синтеза), когда образуются ядра элементов средней массы, выделяется огромное количество энергии.

Термоядерные реакции синтеза являются источником энергии звезд. Ближайшая к нам звезда – Солнце – это естественный термоядерный реактор, который уже многие миллиарды лет снабжает энергией жизнь на Земле. Из искусственно созданных человеком ядерных реакторов можно отметить, созданный в 1997 году – Европейский токамак, на котором было получено 16 МВт термоядерной мощности.

В первых термоядерных реакторах, которые пока находятся в стадии отработки и исследований, предполагается использование реакции синтеза дейтерия с тритием  $D + T = He + n$ , в результате которой образуется ядро гелия, He, и нейтрон. Необходимое условие для того, чтобы такая реакция пошла: это достижение высокой температуры смеси (примерно сто миллионов градусов). Только в этом случае реагирующие частицы могут преодолеть электростатическое отталкивание и при столкновении могут на короткое время, приблизиться друг к другу на расстояние, при котором возможна ядерная реакция. При такой температуре смесь изотопов водорода полностью ионизируется и превращается в плазму – смесь электронов и ионов. Кроме высокой температуры, для положительного выхода энергии нужно, чтобы время жизни плазмы  $t$ , помноженное на плотность реагирующих ионов  $n$ , было достаточно велико. Основная физическая проблема, с которой столкнулись исследователи на первых шагах на пути к термоядерному синтезу – это различные плазменные неустойчивости, приводящие к ее турбулентности. Именно они сокращали время жизни в первых установках до величины на много порядков меньше ожидаемой и не позволяли достигнуть необходимой величины выхода полезной энергии. Сегодня существуют два принципиальных подхода к созданию термоядерных реакторов, и пока не ясно, какой подход окажется наиболее выгодным.

В так называемом инерционном термоядерном синтезе несколько миллиграмм дейтериево-тритиевой смеси сжимаются оболочкой, ускоряемой за счет реактивных сил, возникающих при испарении оболочки с помощью мощного лазерного или рентгеновского излучения. Энергия выделяется в виде микровзрыва, когда в процессе сжатия в смеси дейтерия с тритием достигаются необходимые условия для термоядерного горения. Ограничения на степень сжатия связаны с небольшой, но всегда существующей неоднородностью падающего на оболочку излучения и с несимметрией самой мишени, которая еще и нарастает в процессе сжатия из-за развития неустойчивостей. В результате появляется некая критическая масса мишени и, следовательно, критическая энергия, которую нужно вложить оболочку для ее разгона и получения положительного выхода энергии. В соответствии с современными теориями, в мишень с массой топлива около 5 миллиграмм и радиусом 1-2 миллиметра, нужно вложить около 2 МДж за время  $5 \cdot 10^{-4}$  -  $5 \cdot 10^{-7}$  с. При этом энергия микровзрыва будет на уровне всего 54108 Дж (эквивалентно около 100 кг обычной взрывчатки) и может быть легко удержана достаточно прочной камерой. Предполагается, что будущий термоядерный реактор будет работать в режиме последовательных микровзрывов с частотой в несколько герц, а выделяемая в камере энергия будет сниматься теплоносителем и использоваться для получения электроэнергии.

Другое направление в управляемом термоядерном синтезе - это термоядерные реакторы, использующие магнитное удержании плазмы. Магнитное поле используется для изоляции горячей дейтериево-тритиевой плазмы от контакта со стенкой. В отличие от инерционных реакторов магнитные термоядерные реакторы – это стационарные устройства с относительно низким объемным выделением энергии и относительно большими размерами. За 40 лет термоядерных исследований были предложены различные системы для магнитного удержания, среди которых



**Рис. 1.15. Устройство термоядерного реактора «Токомак»**

сейчас лидирующее положение занимает реактор получивший название - «Токомак». Упрощенная схема устройства этого реактора показана на рисунке 1.15. На этом рисунке: 1 – витки; 2 – плазма; 3 – тороидальные катушки; 4 – индуктор.

В основе реактора этого типа находится тороидальная камера, надетая на сердечник трансформатора, эта камера является вторичной обмоткой трансформатора. Камеры заполняется смесью газов, содержащих те атомы, которые будут участвовать в синтезе. Затем по первичной обмотке трансформатора пропускают импульс тока, достаточный для того, чтобы во вторичной «обмотке» (т.е. в камере с газом) произошел электрический пробой и начал протекать ток. Ток, текущий по плазме, создает свое магнитное поле, которое сжимает плазму, увеличивая ее температуру. Но этого еще недостаточно для достижения необходимого нагрева, поскольку с ростом температуры сопротивление плазмы и выделение тепла уменьшаются. Поэтому плазму надо нагревать дополнительно. Этот добавочный нагрев может достигаться электромагнитным излучением частотой от 10 МГц до 10 ГГц, или потоком нейтральных атомов с высокой энергией – около 0,1 МэВ или сжатием внешним переменным магнитным полем.

В токамаке горячая плазма имеет форму тора и удерживается от контакта со стенкой рабочей камеры, с помощью магнитного поля создаваемого как внешними магнитными катушками, так и током, протекающим по самой плазме. Для избежания энергетических расходов на поддержание магнитного поля, оно создается в реакторе сверхпроводящими магнитами. Такая технология уже имеется – один из крупнейших

экспериментальных токамаков, Т-15, построенный несколько лет назад в России, использует сверхпроводящие магниты для создания магнитных полей.

Предполагается, что в рабочем режиме реактор будет работать в режиме самоподдерживающегося термоядерного горения, при котором высокая температура плазмы обеспечивается за счет нагрева плазмы заряженными продуктами реакции альфа-частицами (ионами He). Для этого, нужно иметь время удержания энергии в плазме не меньше 5 с. Большое время жизни плазмы в токамаках и других стационарных системах достигается за счет их размеров, и поэтому существует некий критический размер реактора. Оценки показывают, что самоподдерживающаяся реакция в токамаке возможна в том случае, если большой радиус плазменного тора будет 7– 9 м. Соответственно, токамак-реактор будет иметь полную тепловую мощность на уровне 1 ГВт.

К достоинствам этого типа реакторов относится следующее. Токамак не выделяет никаких вредных веществ – ни химических, ни радиоактивных. В случае аварии токамака он менее опасен, чем атомный реактор, и не намного более опасен, чем станция на угле.

Одной из важных проблем токамака является обеспечение чистоты плазмы, так как попадающие в плазму примеси прекращают реакцию. Попадают они в плазму со стенок камеры, так как запускаемые в объем рабочие вещества можно очистить, а стенка камеры работает в таких условиях, что возникает проблема – из чего сделать. Все, что выходит из плазмы (нейтроны, протоны, ионы и электромагнитное излучение в диапазоне от инфракрасного до гамма-лучей), разрушает стенку, продукты разрушения попадают в плазму. Одно время большие надежды возлагались на углеродные материалы и композиты на основе карбидов, боридов и нитридов. Рассматривались пористые и профилированные (с ребрами или иглами) стенки. И вообще, трудно сказать, что не рассматривалось, но в итоге в качестве материала стенок сейчас выбран бериллий.

Несмотря на большие успехи, достигнутые в этом направлении, термоядерным реакторам предстоит еще пройти большой путь прежде, чем будет построен первый коммерческий термоядерный реактор.

### **Контрольные вопросы**

Какое устройство называется – термоядерный реактор?

В чем заключается инерционный термоядерный синтез?

Что такое – термоядерный реактор, использующий магнитное удержание плазмы?

Каковы достоинства и недостатки ядерных реакторов?

## Лекция 16. Водородная энергетика

Водород является одним из основных компонентов в нефтехимии для глубокой переработки нефти, без него не обойтись, скажем в химии при получении аммиака и азотных удобрений, а в черной металлургии с его помощью восстанавливается железо из руд. Такие существующие виды органического топлива, как газ, нефть и уголь, тоже служат сырьем в этих или подобных процессах, но еще полезнее извлечь из них самый экономный и чистый энергоноситель – тот же водород. Водород – идеальный экофильный вид топлива. Очень высока и его калорийность - 33 тысячи Ккал/кг, что в 3 раза выше калорийности бензина. Он легко транспортируется по газопроводам, потому что у него очень малая вязкость. По трубопроводу диаметром 1,5м с ним передается 20 тыс. Мегаватт мощности. Чтобы продемонстрировать его возможности, американские ученые построили "водородный дом", в котором для освещения использовался водород. Переход на водородную энергетику обещает ряд выгод. Сейчас в мире получают около 30 миллионов тонн водорода в год, причем в основном из природного газа. Согласно прогнозам за 40 лет производство водорода должно увеличиться в 20-30 раз.

Существует множество методов промышленного производства водорода. Среди этих методов основными являются следующие. Газификация угля. Старейший способ получения водорода. Уголь нагревают с водяным паром при температуре 800-1300 °С без доступа воздуха. Паровая конверсия природного газа метана. В настоящее время данным способом производится примерно половина всего водорода. Водяной пар, при температуре 700-1000 °С, смешивается с метаном под давлением в присутствии катализатора.

Сейчас открывается возможность, с помощью атомной энергетики, заменить нынешний источник водорода – природный газ – на более дешевое и доступное сырье – на воду. Здесь возможны два варианта. Первый вариант – традиционный, с помощью электрохимического разложения воды. Второй вариант менее известен. Если нагреть пары воды до 3000-3500 С, то водные молекулы развалятся сами собой. Оба способа получить водород из воды пока дороже, чем из природного газа. Недавно было предложено простое высокопроизводительное устройство для разложения воды и производства из нее дешевого водорода методом гравитационного (инерционного) электролиза раствора электролита, получившее название – электроводородный генератор (ЭВГ). Он приводится в действие механическим приводом и работает при обычной температуре в режиме теплового насоса, поглощая через свой теплообменник необходимое при этом тепло из окружающей среды. В процессе разложения воды подведенная к приводу ЭВГ избыточная механическая энергия может быть на 80 % преобразована в электроэнергию,

которая затем используется любым потребителем на нужды полезной внешней нагрузки. При этом на каждую единицу затраченной мощности привода генератором в зависимости от заданного режима работы поглощается от 20 до 88 энергетических единиц низкопотенциального тепла, что собственно и компенсирует отрицательный термический эффект химической реакции разложения воды. Один кубический метр условного рабочего объема генератора, работающего в оптимальном режиме с КПД 86-98 %, способен за секунду произвести 3,5 м<sup>3</sup> водорода и одновременно около 2,2 МДж постоянного электрического тока. Физический принцип рабочего процесса ЭВГ весьма прост. Известно, что электролит при растворении диссоциирует на ионы, которые гидратируются молекулами воды. В результате вокруг них образуются гидратные оболочки различной прочности. Энергия взаимодействия гидратированных разноименных ионов друг с другом резко уменьшается и становится близкой энергии броуновского движения молекул воды. Если концентрированный раствор диссоциированного электролита, имеющего значительную разницу масс аниона и катиона, поместить в сильное искусственное инерционное поле, например, вращать его в емкости ЭВГ (расчетная частота вращения для различных электролитов и параметров устройства 1500-25000 об/мин), то ионы будут отчасти сепарироваться. Сепарированные тяжелые ионы, воздействуя друг на друга своим электрическим полем, сместятся к периферии емкости. Крайние прижмутся к ее внутренней поверхности и создадут пространственный концентрационный электрический потенциал. При этом результирующая центробежная сила, действующая на прижатые к аноду ионы (анионы) разрушит их гидратные оболочки, как наиболее слабые. Легкие ионы менее отзывчивы к гравитации и окружены более прочными оболочками, поэтому не могут отдать тяжелым ионам свои молекулы гидратной воды. В силу этих обстоятельств они сосредоточатся над тяжелыми ионами и в области оси вращения (у катода), образуя электрический потенциал противоположного знака. Свободные электроны в аноде под действием пространственного (объемного) заряда анионов переместятся на катод (свойство цилиндра Фарадея).

При достижении необходимой минимальной (пороговой) частоты вращения емкости с данным электролитом и принятыми конструктивными параметрами устройства критической величины электрических потенциалов на электродах, равновесие зарядов нарушится. Электроны выйдут из катода и ионизируют молекулы гидратных оболочек, а те передадут заряды катионам. Иначе говоря, как бы произойдет пробой своеобразного электролитического конденсатора и начнется разряд ионов с образованием на катоде свободного водорода, а на аноде кислорода и анодных газов (осадка). Напряжение электрического тока будет зависеть от разности скоростей химических реакций на катоде и аноде.

Таким образом, принципиальная энергетическая схема рассмотренного генератора, во многом схожа со схемой традиционного электролиза, но в

ней не применяется внешний дорогостоящий электрический ток, а используется более дешевая теплота окружающей сред.

Электроводородный генератор конструктивно прост, органично вписывается в компоновку различных силовых двигательных установок транспортных средств, например, автомобиля, автобуса, сельхозмашины или трактора и хорошо с ними агрегируется, особенно с тепловыми турбинами.

Существуют и другие методы получения водорода. Рассмотрим некоторые из них.

**Холодный ядерный синтез.** Теоретические и экспериментальные исследования многих авторов показывают, что наиболее вероятным источником водорода, получаемого из воды, может стать её плазменный электролиз. При обычном электролизе, американские ученые Понс и Флешман в 1989 году показали возможность получения дополнительной энергии, зафиксированные ими при плазменном электролизе воды.

По их мнению, источником этой энергии является холодный ядерный синтез. В дальнейшем было установлено наличие испускания до 1000 нейтронов в 1 секунду при массовом захлопывании кавитационных пузырьков и выделении тепловой энергии в 20 раз больше чем затраченной на образование потока воды в трубе. Кавитация как резонанс частоты колебаний молекул жидкости с частотой колебаний пузырьков пара, их образованием и схлопыванием сопровождается разгоном звуковых и ударных волн, высокими параметрами на фронте волны и низкими за фронтом волны. Это приводит к распаду вещества на элементарные частицы с выделением большого количества тепла. Автор этой работы предполагает, что во время захлопывания пузырьков существует вероятность захвата протонами электронов и образует атом водорода (при температуре 10000 К). Как известно, атомы водорода существуют в интервале температур 5000-100000С, что показывает возможность формирования плазмы с такой температурой при определенной плотности атомов водорода в единице объема. В таких условиях молекула воды должна разрушаться, и ядро атома водорода превратиться в нейтрон. Последний, далее, присоединяется к другому атому водорода или кислорода другой молекулы воды, образуя, дейтерий или тритий или более тяжелый изотоп кислорода. При этом выделяется внутриядерная энергия и осуществляется холодный ядерный синтез.

**Плазменный электролиз воды.** В 1999 году было установлено, что источником дополнительной энергии при обычном и плазменном электролизе воды является не синтез ядер, а синтез атомов и молекул водорода. В последующем были получены результаты, показывающие уменьшение затрат энергии на получение водорода при плазменном электролизе воды. Таким образом, для того чтобы водородная энергетика состоялась, нужно, чтобы полученная энергия при сжигании водорода намного превышала затраченную энергию на его получение.

Известно, что в природе существует экономный процесс разложения молекул воды на водород и кислород. Например, при фотосинтезе атомы водорода отделяются от молекул воды, и используется в качестве соединительных звеньев при формировании органических молекул, а кислород уходит в атмосферу. По данным некоторых исследователей, в низкотемпературном электролизере процесс электролиза воды аналогичен тому, который идет при фотосинтезе.

Высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем - это новый тип экологически чистых универсальных атомных энергоисточников, уникальные свойства которых – способность вырабатывать тепло при температурах более 1000°C и высокий уровень безопасности - определяют широкие возможности их использования для производства в газотурбинном цикле электроэнергии с высоким КПД и для снабжения высокотемпературным теплом и электричеством процессов производства водорода, опреснения воды, технологических процессов химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и др. отраслей промышленности. Одним, из наиболее интересных в этой области, является международный проект ГТ-МГР, который разрабатывается совместными усилиями российских институтов «Курчатовский институт», НПО «Луч») и американской компании GA. С проектом сотрудничают также компании Фраматом и Фуджи электрик.

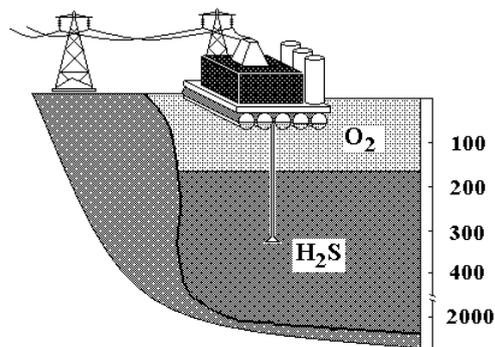
К настоящему времени разработан проект модульного гелиевого реактора для генерации электричества (с КПД ~ 50%) с использованием прямого газотурбинного цикла. Энергетическая установка ГТ-МГР состоит из двух связанных воедино блоков: модульного высокотемпературного гелиевого реактора (МГР) и газотурбинного преобразователя энергии прямого цикла (ГТ). Работы находятся на стадии технического проектирования с экспериментально-стендовой отработкой ключевых технологий: топливо и система преобразования энергии. В настоящее время проводится оценка технологического применения этого проекта для производства водорода с использованием термохимических циклов. Создание такого тандема открывает путь широкому применению ядерной энергии в энергоемкой промышленности: химии и металлургии, а также позволяет путем выработки вторичного энергоносителя (чистого водорода или его смеси с СО) создавать ядерные энерго-технологические комплексы для регионального теплоэнергоснабжения с поставкой топлива для транспорта и низкопотенциального тепла для коммунально-бытовых нужд и коммерческого сектора.

Особый интерес представляет электролиз в сочетании с возобновляемыми источниками энергии. Например, Исследовательский центр Энергии Университета Гумбольта разработал автономную солнечно – водородную систему, которая использует фотоэлектрический элемент мощностью 9,2 кВт, чтобы обеспечить привод компрессоров для аэрации бассейнов рыборазведения, и биполярный щелочной электролизер

мощностью 7,2 кВт, способный производить 25 литров водорода в минуту. Система работает автономно начиная с 1993 г. Когда отсутствует солнечный свет, запасенный водород служит топливом для полуторакиловаттного электрохимического генератора, обеспечивающего приводком прессоров.

Недавно был предложен еще один проект получения водорода. Проект основан на том, что во многих водоемах (например, в Черном море), на глубине порядка 150-200 метров имеется большая концентрация растворенного в воде сероводорода, в тоже время на меньших глубинах в основном содержится растворенный кислород. Поднимая воду из глубинных слоев, и воздействуя на нее электрическим током, можно получить два элемента серу и водород. Более того при сжигании одного килограмма самого сероводорода выделяется около 4 тысяч килокалорий.

На рисунке 1.16. показана проектная схема такой энергетической установки.



**Рис. 1.16. Схема энергетической установки для использования сероводорода**

Разработки новых водородных технологий в разных странах различаются. Это связано и с неравномерной обеспеченностью природными энергоресурсами, и с особенностями их технологического развития. Например, в разработках водородных технологий, выполняемых в США, Германии и России, используется опыт ракетной техники, атомной и химической промышленности, специальной металлургии, криогенной промышленности, в Японии – опыт высоких технологий электронной, электротехнической, металлургической промышленности и зарубежный опыт криогенной и авиационно-космической техники.

Крупные национальные программы в области водородной энергетики и технологии реализуются в США, Канаде, Германии, Японии, Китае, странах ЕС и ряде других. Выполняется ряд международных программ и проектов. В странах ЕС действует программа по созданию водородных автобусов и реализуется ряд других проектов, связанных с созданием инфраструктуры обеспечения водородом. Япония с участием иностранных партнёров реализует крупный проект «Мировая энергетическая сеть с использованием водорода (WE-NET)». Между ведущими фирмами различных стран заключены многочисленные соглашения о совместных разработках новых водородных технологий.

Исландия заявила, что она намерена стать первой в мире страной, решившей отказаться от использования ископаемых энергоносителей и перейти на водородную энергетику, причём как на суше, так и на море.

В ноябре 2003 года 15 стран подписали соглашение «Международное партнёрство по водородной экономике». Участниками этого партнёрства

стали: Австралия, Англия, Бразилия, Германия, страны Евросоюза, Индия, Исландия, Италия, Канада, Китай, Норвегия, Республика Корея, Россия, США, Франция и Япония.

### Контрольные вопросы

- Какие существуют методы промышленного производства водорода?
- В чем особенности метода плазменного электролиза воды?
- В чем заключается метод инерционного электролиза?
- В чем заключаются основные преимущества водородной энергетики?
- В каких странах реализуются программы в области водородной энергетики?

### Лекция 17. Двигатель Стирлинга

Двигатель Стирлинга – двигатель, работающий по замкнутому регенеративному циклу (цикл Стирлинга). Этот цикл состоит из последовательно чередующихся двух изотермических и двух изохорических процессов. Диаграмма идеализированного цикла Стирлинга показана на рисунке 1.17. Рабочим телом этого двигателя может служить гелий или водород, которые находятся под давлением 100-140 кгс/см. Рабочее тело находится в замкнутом пространстве и во время работы не расходуется, а только изменяет свой объем при нагревании и при охлаждении. Регенератор – теплообменник разделяет рабочее пространство на две части: горячую (верхнюю) полость и холодную (нижнюю) полость. При этом к верхней полости тепло подводится от нагревателя, а от нижней полости тепло отводится охладителем, в котором циркулирует вода. Горячая и холодная полости соединены между собой каналами, проходящими через нагреватель, регенератор-теплообменник и охладитель. Упрощенная схема двигателя Стирлинга приведена на рисунке 2.17. На этом рисунке: 1 – горячая полость; 2 – нагреватель; 3 – поршень - вытеснитель; 4 – теплообменник; 5 – охладитель; 6 – холодная полость; 7 – рабочий поршень; 8 – наружное уплотнение; 9 – колеса, синхронизирующие работу поршней; 10 – ромбический механизм; 11 – корпус. Как видно из рисунка двигатель Стирлинга имеет два поршня: рабочий поршень и поршень-вытеснитель. Рабочий цикл двигателя Стирлинга осуществляется за 4 такта. В течении 1 – го такта поршень вытеснитель неподвижен, а рабочий поршень перемещается вверх и сжимает рабочее тело в нижней полости. В конце

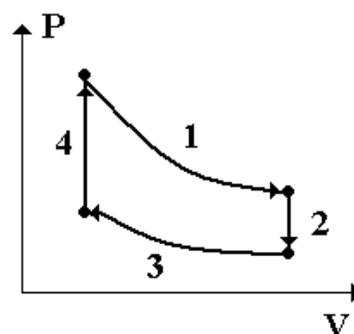
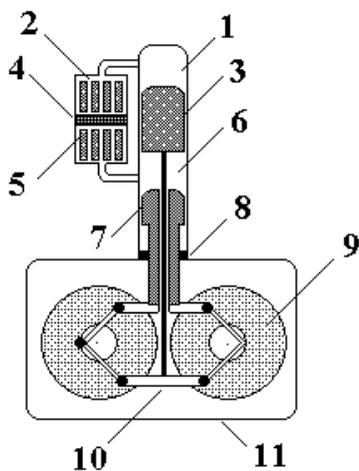


Рис. 1.17. Диаграмма идеализированного цикла Стирлинга

сжатия рабочий поршень останавливается. Начинается 2 такт, в течении которого вытеснитель движется вниз, при этом холодное сжатое рабочее тело перетекает из



**Рис. 2.17. Схема двигателя Стирлинга**

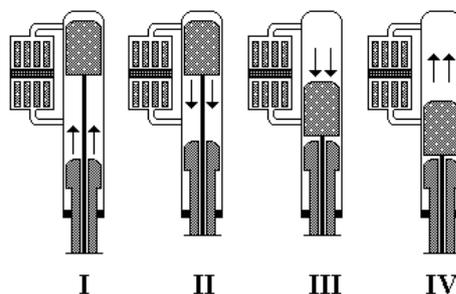
нижней полости в верхнюю, подогреваясь сначала в регенераторе, а затем в нагревателе. 3-такт рабочий – ход, в течении которого рабочее тело, расширяясь в верхней полости, совершает полезную работу. Во время рабочего хода оба поршня совместно движутся вниз. В 4-м такте рабочий поршень остается неподвижным, а вытеснитель движется вверх; рабочее тело из верхней полости поступает в нижнюю, отдавая сначала часть теплоты регенератору, а затем окончательно охлаждается в охладителе. Преобразование возвратно - поступательного движения поршней во вращательное движение осуществляется ромбическим механизмом.

Схема работы двигателя Стирлинга показана на рисунке 3.17. На этом рисунке: I – такт сжатия; II – такт нагревания; III – такт рабочего хода; IV – такт охлаждения.

Существуют и V - образные двигатели Стирлинга двойного действия. В этих двигателях в каждом из двух цилиндров находится по одному поршню, обеспечивающих сжатие, расширение и вытеснение рабочего тела. Рабочий процесс осуществляется одновременно в двух полостях, расположенных по обеим сторонам поршня. При этом, рабочий поршень каждого цилиндра одновременно является вытеснителем для соседнего цилиндра. Полный рабочий цикл осуществляется за оборот кривошипного механизма, как это происходит в двухтактном двигателе внутреннего сгорания. Схема такого двигателя показана на рисунке 4.17. На этом рисунке: 1 – теплообменник; 2 – горячая полость; 3 – холодная полость; 4 – поршня.

Существующие разновидности двигателя Стирлинга подразделяются на три типа.

Альфа - Стирлинг – содержит два отдельных силовых поршня в отдельных цилиндрах. Один поршень – горячий, другой - холодный. Цилиндр с горячим поршнем находится в теплообменнике с более высокой температурой, в то время как цилиндр с холодным поршнем находится в более холодном теплообменнике. Регенератор находится между горячей частью соединительной трубки и холодной. У данного типа двигателя



**Рис. 3.17. Схема работы двигателя Стирлинга**

отношение мощности к объёму достаточно велико, но высокая температура «горячего» поршня создаёт определённые технические трудности.

Бета-Стирлинг – цилиндр всего один, горячий с одного конца и холодный с другого. Внутри цилиндра движутся поршень (с которого снимается мощность) и «вытеснитель», изменяющий объём горячей полости. Газ перекачивается из холодной части цилиндра в горячую его часть через регенератор. Регенератор может быть внешним, как часть теплообменника, или может быть совмещён с поршнем-вытеснителем.

Гамма - Стирлинг – имеется поршень и «вытеснитель», но при этом два имеется два цилиндра - один холодный (там движется поршень, с которого снимается мощность), а второй горячий с одного конца и холодный с другого (там движется «вытеснитель»). Регенератор может быть внешним, в этом случае он соединяет горячую часть второго цилиндра с холодной и одновременно с первым (холодным) цилиндром. Внутренний регенератор является частью вытеснителя.

Также следует отметить еще одну разновидность двигателя Стирлинга - роторный двигатель Стирлинга. Этот двигатель отличается от выше описанных наличием промежуточного контура, выполняющего роль буферной емкости для отработанного газа и временного замедлителя. Временный замедлитель дает возможность нагреть газ за время движения кулачка по промежуточному контуру. Роторный принцип имеет значительные положительные качества, которые недоступны поршневым двигателям, и первое из них – это миниатюрность, позволяющая сделать не только миниатюрным сам двигатель, но и разместить внутри него электрогенератор без существенного увеличения размеров. Другое важное преимущество – постоянство крутящего момента, т.к. плечо ротора постоянно. Еще одно преимущество - это строгая очередность протекания тактов – ротор переходит в следующий сегмент только после того, как полностью отработал в предыдущем, в поршневом же двигателе движение поршней подчинено синусоидальному закону, что снижает усилие газа на величину противодействия. Немаловажным качеством является и то, что отсутствуют возвратные движения, ротор движется только поступательно, нет необходимости демпфирования, что также увеличивает эффективный КПД. Еще одним положительным качеством является то, что в теплопереносе участвует весь объем рабочего тела, а не часть его, как в поршневых двигателях.

Двигатель Стирлинга может использоваться для преобразования солнечной энергии в электрическую энергию. Для этого двигатель

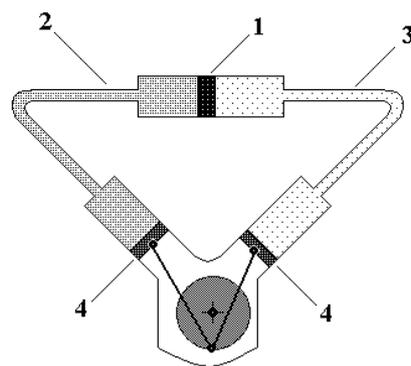


Рис. 4. 17. Схема V-образного двигателя Стирлинга

Стирлинга устанавливается в фокус параболического зеркала, таким образом, чтобы область нагрева была постоянно освещена. Параболический отражатель управляется по двум координатам при слежении за солнцем. Энергия солнца фокусируется на небольшой площади. Зеркала отражают около 92 % падающего на них солнечного излучения. В качестве рабочего тела двигателя Стирлинга, используемого для преобразования солнечной энергии, применяется водород, или гелий.

В 2008 году Национальная лаборатория Sandia получила эффективность преобразования солнечной энергии 31,25 % на установке, состоящей из параболического концентратора и двигателя Стирлинга. Компания Stirling Solar Energy разрабатывает солнечные коллекторы большой мощности – до 150 кВт на одно зеркало. Компания строит в южной Калифорнии крупнейшую в мире солнечную электростанцию, с использованием двигателя Стирлинга.

К основным преимуществам относятся следующие факторы. Двигатель Стирлинга может работать от почти любого перепада температур: например, между разными слоями воды в океане, от солнца, от ядерного или изотопного нагревателя, угольной или дровяной печи. при небольших перепадах температур этот двигатель является самым эффективным, по сравнению с другими видами двигателей. Этот двигатель не имеет выхлопа, а значит уровень его шума гораздо меньше, чем у поршневых двигателей внутреннего сгорания. Сам по себе двигатель Стирлинга не имеет каких-то частей или процессов, которые могут способствовать загрязнению окружающей среды. Он не расходует рабочее тело. Экологичность двигателя обусловлена, прежде всего, экологичностью источника тепла.

Недостатки этого типа двигателей. Рабочее тело, используемое в двигателе, необходимо охлаждать, и это приводит к существенному увеличению массо-габаритных показателей силовой установки за счёт увеличенных радиаторов. Тепло подводится не к рабочему телу непосредственно, а только через стенки теплообменников. Стенки имеют ограниченную теплопроводность, из-за чего КПД оказывается ниже, чем можно было ожидать. Сильно нагреваемый теплообменник работает в очень напряжённых условиях теплопередачи, и при высоких давлениях, что требует применения высококачественных и дорогих материалов.

### **Контрольные вопросы**

- В чем заключается принцип работы двигателя Стирлинга?
- Что может использоваться в качестве рабочего тела в двигателе Стирлинга?
- Какие разновидности двигателя Стирлинга существуют в настоящее время?

Каковы достоинства и недостатки существующих двигателей Стирлинга?

## Лекция 18. Кавитационные теплогенераторы

Принцип работы кавитационного теплогенератора заключается в том, что вода нагревается не путем источника тепла, а за счет кавитации. Кавитация – явление образования в капельной жидкости полостей заполненных газом, паром или их смесью. Эти полости получили название – кавитационных пузырьков. Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкости понижается. Поскольку в реальной

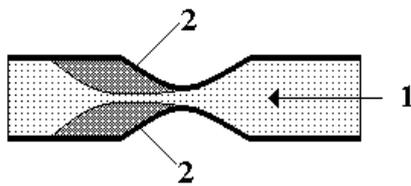


Рис. 1.18. Зоны кавитации жидкости, текущей по трубе с переменным сечением

жидкости всегда присутствуют мельчайшие пузырьки газа или пара, то двигаясь с потоком жидкости и попадая в область с пониженным давлением, они приобретают способность к неограниченному росту, т.е. к увеличению своего объема. При достижении критической величины давления – пузырьки лопаются, при этом выделяется энергия, которая и нагревает жидкость. После перехода в область с повышенным давлением

рост пузырьков прекращается, и они начинают сокращаться. Таким образом, в трубе с местным сужением диаметра создается четкая кавитационная зона, заполненная движущимися пузырьками жидкости. На рисунке 1.18. показана труба с переменным сечением и области образующейся кавитации. На этом рисунке: 1 – поток жидкости; 2– кавитационные зоны. Существует два метода понижения давления внутри жидкости. Первый метод заключается в том, что развиваются большие скорости в потоке движущейся жидкости. Второй метод образуется, когда сквозь жидкость проходят акустические волны.

В результате первый метод получил название гидродинамический, в второй метод – акустический. Эффект кавитации в жидкости уже используется для получения тепловой энергии. Достаточно широко применяются кавитационные теплогенераторы (вихревые, роторные и комбинированные), основанные на полезном использовании явления выделения тепловой энергии при кавитации в жидкости. Устройство простейшего кавитационного теплогенератора показано на рисунке 2.18. На

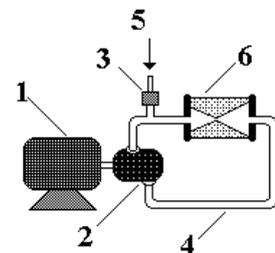
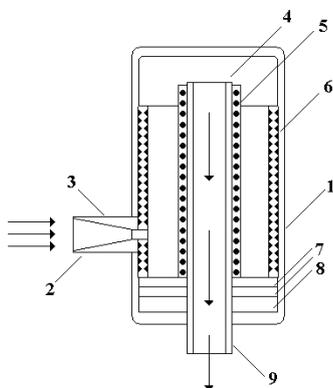


Рис. 2.18. Простейший кавитационный теплогенератор

этом рисунке: 1–электродвигатель; 2 – водяной насос; 3 – кран для впуска

холодной воды; 4 – замкнутый трубопровод; 5 – источник холодной воды; 6 – кавитатор.

Устройство ротоно - вихревого кавитационного устройства нагрева воды показано на рисунке 3.18 На этом рисунке: 1 – рабочий цилиндр; 2–



входной патрубок; 3 – сопло Лавалья; 4– внутренний цилиндр; 5,6 – кавитаторы; 7–

кольцевые постоянные магниты; 8 – стальное кольцо; 9 – выходной патрубок. В этом устройстве вода под напором поступает сначала в коническое

сопло Лавалья, ускоряется в нем и поступает в рабочий цилиндр. Здесь вода начинает интенсивно раскручиваться внутри рабочей цилиндрической

полости, образованной боковыми поверхностями двух цилиндров. В результате интенсивного вращения воды и взаимодействия с двумя

неподвижными кавитаторами, возникает активная кавитация, приводящая к нагреву воды. Более нагретые слои кавитирующей воды

концентрируясь в потоке вокруг кавитатора, доходят выходного патрубка. Кольцевой

постоянный магнит, размещенный на металлической стальной шайбе, осуществляет дополнительную очистку воды посредством удержания им

мелких ферромагнитных микрочастиц из поступающей в камеру воды.

Главным недостатком кавитационных теплогенераторов является наличие мощного электродвигателя. Тем не менее, такие кавитационные нагреватели, основанные на гидродинамическом способе нагрева жидкостей, нашли достаточно широкое применение, поскольку лишены многих недостатков присущих классическим нагревателям, использующих электрические теплонагревательные элементы. В частности, потому что с их помощью можно нагревать практически любые жидкости, в то время как теплонагревательные элементы весьма требовательны к качеству подогреваемой жидкости.

**Контрольные вопросы**

В чем заключается явление кавитации?

Какое устройство называется – кавитационный теплогенератор?

Какие методы воздействия приводят к понижению давления внутри жидкости?

Каково устройство ротоно - вихревого кавитационного нагрева воды?

Каковы достоинства и недостатки кавитационных теплогенераторов?

## Лекция 19.

### Магнитогидродинамические генераторы

В течение последних нескольких десятилетий было предпринято несколько серьёзных попыток получения электричества с помощью магнитогидродинамического преобразования. С этой целью был создан магнитогидродинамический генератор (МГД). Магнитогидродинамический генератор – устройство, в котором внутренняя, тепловая или кинетическая и потенциальная энергии потока электропроводящей этой среды преобразуются в электрическую энергию. Принцип работы МГД генератора основан на явлении электромагнитной индукции, то есть на возникновении электрического тока в проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля. В отличие от генераторов других типов, в МГД-генераторе проводником является само рабочее тело, в котором при движении поперёк магнитного поля возникают противоположно направленные потоки носителей зарядов обоих знаков. Рабочим телом магнитогидродинамического генератора может быть низкотемпературная плазма или проводящая жидкость (жидкие металлы, электролиты). Если рабочим телом является газообразный проводник – плазма, то носителями заряда являются свободные электроны и положительные ионы. В сильном

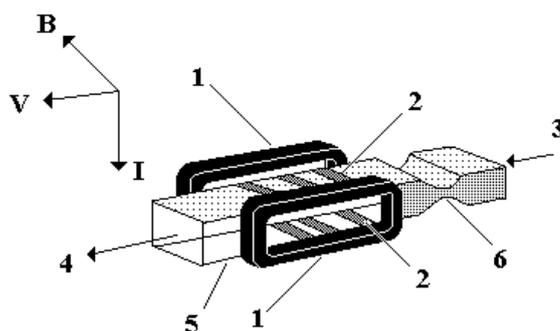


Рис. 1.19. Схема устройства магнитогидродинамического генератора

магнитном поле заряженные частицы изменяют траекторию своего движения и смещаются в плоскости перпендикулярной направлению магнитного поля. Такое направленное смещение заряженных частиц приводит к возникновению дополнительного электрического поля (поле Холла), направленного перпендикулярно потоку заряженных частиц.

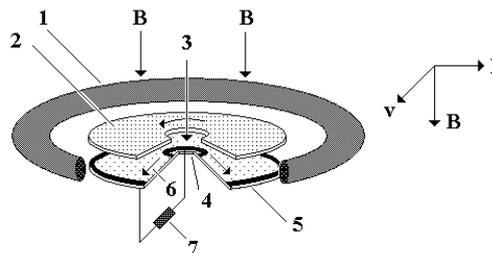
Низкотемпературная плазма, используемая в магнитогидродинамических генераторах, представляет собой продукты сгорания природных или специальных топлив с легкоионизируемыми добавками соединений щелочных металлов. Также могут быть использованы инертные газы со щелочными добавками.

Упрощенная схема устройства магнитогидродинамического генератора показана на рисунке 1.19. На этом рисунке: 1 – обмотки электромагнита; 2 – токосъемные электроды, с которых снимается полученная электроэнергия; 3 – система ввода используемого газа; 4 – выход продуктов сгорания; 5 – рабочий канал; 6 – сопло. Из приведенной схемы видно, что сильно разогретый газ направляется через сопло в канал с

сильными магнитами, где за счёт разделения в магнитном поле раскалённого потока на ионную и электронную составляющие получают непосредственно электроэнергию. Принцип процесса очень экономичный с КПД до 60%, поскольку исключаются все механические процессы, однако электроды, снимающие ток с высокотемпературного газа, работают в условиях аномально высоких температур и, в ряде случаев – расплавляются. Это накладывает сильное ограничение на их длительное использование. По способу отвода выработанной электрической энергии магнитогидродинамические генераторы разделяют на два типа: кондукционные и индукционные генераторы.

В кондукционных генераторах в рабочем теле, протекающем через поперечное магнитное поле, возникает электрический ток который, замыкается на внешнюю цепь через съёмные электроды, установленные на боковых стенках канала. Устройство такого генератора и показано на рисунке 1.19. В зависимости от изменения магнитного поля или скорости движения рабочего тела генератор может генерировать постоянный или переменный (пульсирующий) ток. В индукционных генераторах электроды отсутствуют. Такие генераторы генерируют только переменный ток, но требуют наличия, бегущего вдоль канала, магнитного поля. Возможно использование каналов различной формы: линейной, дисковой или радиальной. По схеме соединения электродов различают: фардеевский генератор, со сплошными или секционированными электродами, холловский генератор в котором расположенные друг против друга электроды короткозамкнуты, а напряжение снимается вдоль всего канала за счёт поля Хола.

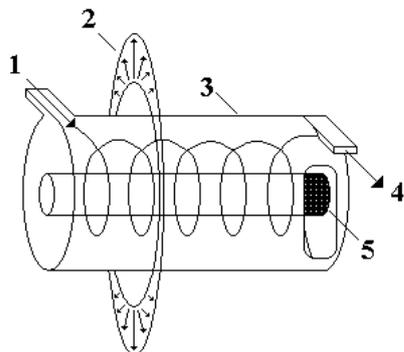
На рисунке 2.19 показано устройство дискового холловского генератора. На этом рисунке показаны: 1 – обмотка индуктора; 2 – канал генератора; 3 – подвод рабочего тела; 4 – входной холловский электрод; 5 – выходной холловский электрод; 6 – направление движения зарядов; 7 – нагрузка.



**Рис. 2.19. Схема дискового холловского МГД-генератора**

Применение магнитогидродинамических генераторов холловского типа более выгодно при больших магнитных полях. За счёт наличия продольного электрического поля в холловском генераторе можно получать значительные напряжения. Устройство коаксиального индукционного магнитогидродинамического генератора показано на рисунке 3.19. На этом рисунке: 1 – подвод рабочего тела; 2 – мгновенная эпюра бегущего магнитного поля; 3 – наружный корпус канала МГД-генератора, на котором размещается волновая обмотка индуктора (статор); 4 – выхлоп; 5 – стенка и внутренний магнитопровод МГД-генератора.

Конструкция МГД генератора и организация течения рабочего тела в канале оказывают существенное влияние на основные характеристики. При использовании в МГД генераторах плазмы инертных газов за счёт



**Рис. 3.19. Схема коаксиального индукционного МГД-генератора**

индуцированного поля возможно повышение температуры электронов, и, как следствие значительное увеличение степени ионизации плазмы и её проводимости.

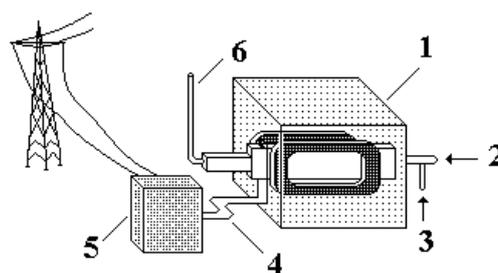
Широкое промышленное применения могут найти генераторы, работающие как по одноконтурному, так и по двухконтурному типу. На рисунке 4.19. показано устройство электростанции на основе МГД генератора, работающей по одноконтурному типу. Здесь: 1— МГД генератор; 2 – устройство ввода топлива; 3—устройство ввода присадки; 4— система вывода генерированной электроэнергии; 5 –преобразователь.

В сочетании с паросиловыми установками, МГД-генератор позволяет получить большие мощности в одном агрегате, до 500-1000 МВт.

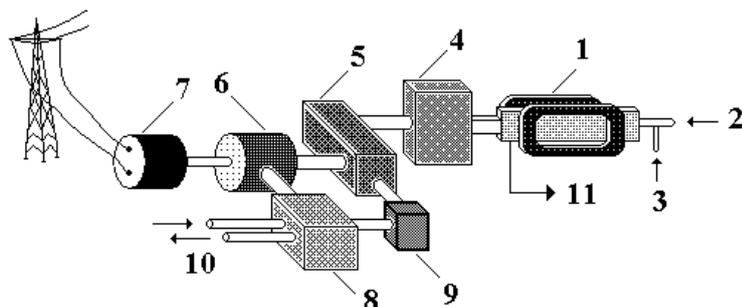
В качестве примера рассмотрим опытно-промышленную МГД – установку У-25 разработанную в Москве. Упрощенное устройство этой установки показано на рисунке 5.19.

На этом рисунке: 1—МГД генератор; 2—устройство ввода топлива; 3—устройство ввода присадки; 4—теплообменник; 5 –парогенератор; 6 – паровая турбина; 7 – электрогенератор; 8 –конденсатор; 9 – конденсатный насос; 10 – ввод и вывод охлаждающей воды; 11— вывод электроэнергии выработанной МГД генератором.

Установка работает на продуктах сгорания природного газа с добавкой  $K_2CO_3$ . Эта добавка используется в качестве ионизирующей присадки, позволяющей при относительно небольших температурах (около 3000 К) сделать продукты сгорания электропроводными. Установка имеет два контура. Первичный контур - разомкнутый, в котором преобразование тепловой энергии продуктов сгорания в электрическую энергию происходит в магнитогидродинамическом генераторе. Вторичный контур - замкнутый, это паросиловой контур, использующий тепло продуктов сгорания вне канала МГД генератора. Тепловая схема установки следующая. Атмосферный воздух, обогащенный кислородом, сжимается в компрессоре и поступает в воздушнонагреватель, откуда нагретая до необходимой



**Рис. 4.19. Устройство электростанции на основе МГД генератора, работающей по одноконтурному типу**



**Рис. 5.19. Устройство электростанции на основе МГД генератора, работающей по двух контурному типу**

температуры, воздушно-кислородная смесь направляется в камеру сгорания. Перед камерой сгорания в поток воздушно-кислородной смеси вводится водный раствор легкоионизирующейся присадки. Ионизированные продукты сгорания разгоняются в сопле и поступают в канал МГД генератора. Канал генератора размещен между обмотками магнита, создающего магнитное поле с индукцией 2 тесла.

Исследования и разработки МГД генераторов широко развёрнуты в России, США, Японии, Нидерландах, Индии и других странах. Основное преимущество МГД-генератора – отсутствие в них движущихся узлов или деталей, непосредственно участвующих в преобразовании тепловой энергии в электрическую. Это позволяет существенно увеличить начальную температуру рабочего тела и, следовательно, КПД всей электростанции.

В сочетании с паросиловыми установками, МГД-генератор позволяет получить большие мощности в одном агрегате, до 500-1000 МВт.

### **Контрольные вопросы**

В чем заключается принцип магнитогидродинамического преобразования энергии?

Что называется – магнитогидродинамический генератор?

На каком физическом эффекте основан принцип работы МГД генератора?

Каков принцип работы коаксиального индукционного МГД генератора?

В чем заключается различие электростанций на основе МГД генератора, работающих по одно и двух контурному типу?

В каких странах мира наиболее широко ведутся разработки МГД генераторов?

## **Лекция 20.**

### **Использование энергии грозовых разрядов.**

Гроза – атмосферное явление, при котором в кучевых облаках, находящихся на высоте 7 -15 км, возникают многократные искровые электрические разряды – молнии, сопровождающиеся громом, ливнями, градом и усилением ветра. Согласно современным представлениям, электризация облаков происходит за счет трения кристалликов льда о смесь водяного пара и мельчайших водяных капелек. Разделение электрических зарядов и образование электрического поля происходит только при интенсивных вертикальных восходящих и нисходящих течениях.

Для более ясного проблемы использования энергии грозовых разрядов, кратко остановимся на основных современных взглядах на грозовые явления. В настоящее время не решен окончательно вопрос, за счет чего получают заряд капельки воды и кристаллики льда в грозовых облаках. Одна группа ученых считает, что капельки и кристаллы льда захватывают заряд из воздуха, другая группа считает, что они заряжаются за счет обмена зарядом при контакте между собой. В результате экспериментальных исследований установлено, что от нижней кромки грозового облака и до слоя с температурой  $0^{\circ}\text{C}$  простирается водная часть облака. В области с температурой от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $15^{\circ}\text{C}$  сосуществуют вода и лед, и при температуре ниже  $15^{\circ}\text{C}$  облако обычно состоит только из ледяных кристаллов. Капельная часть облака, в основном, имеет отрицательный заряд, а ледяная его часть имеет положительный заряд. В средних широтах центр отрицательного заряда грозового облака располагается на высоте около 3 км, а центр положительного примерно на высоте 6 км. Напряженность электрического поля внутри грозового облака составляет 100-300 вольт/см, но перед разрядом молнии в отдельных небольших объемах она может достигать до 1 600 вольт/см. Грозовой процесс невозможен без разделения зарядов в облаке путем конвекции. Поле конвекции в облаках распадается на несколько ячеек (в некоторых грозах до 8). Каждая конвективная ячейка проходит стадию зарождения, зрелости и затухания. В стадии зарождения во всей конвективной ячейке преобладают восходящие течения. В отдельных случаях скорость восходящих потоков может достигать 30 м/сек, однако в основном она составляет 10-12 м/сек. Зрелая конвективная ячейка характеризуется развитием восходящих и нисходящих потоков, электрической активностью (разрядами молний) и выпадением осадков. Такая ячейка имеет горизонтальный диаметр 2-8 км и простирается в высоту до уровня с температурой  $40^{\circ}\text{C}$ . В стадии затухания во всей конвективной ячейке преобладают слабые нисходящие течения с уменьшением электрической активности и количества выпадающих в единицу времени осадков. Полный цикл жизни конвективной ячейки составляет около часа,

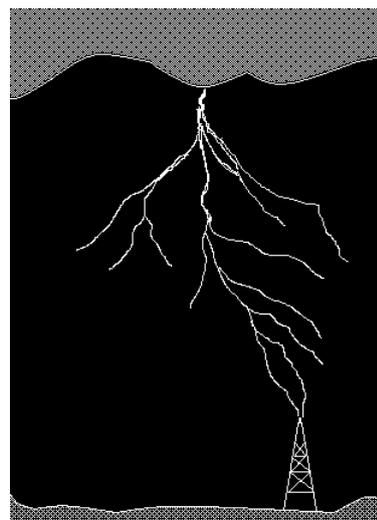
длительность стадии зрелости равна 15-30 минутам, стадии затухания около 30 минут.

Гроза, продолжающаяся несколько часов, является результатом деятельности нескольких конвективных ячеек.

Объем грозового облака, состоящего из смеси капель и ледяных кристаллов, достигает от сотен до нескольких тысяч кубических километров. Масса водно-ледяных частиц, при этом объеме, составляет примерно  $10^6$  -  $10^7$  тонн. Потенциальная энергия грозового облака составляет от  $10^{13}$  до  $10^{14}$  Дж и достигает энергии термоядерной мегатонной бомбы. Молнии, обычно линейные, длиной несколько километров, диаметром десятки сантиметров, относятся к безэлектродным разрядам, так как зарождаются в скоплении заряженных частиц, преобразуя электрическую энергию в тепловую. По условиям развития грозы разделяются: на внутримассовые и на фронтальные. Внутримассовые грозы над материком возникают в результате местного прогрева воздуха от земной поверхности, что приводит к развитию в нём восходящих токов местной конвекции и к образованию мощных кучево-дождевых облаков. Поэтому внутримассовые грозы над сушей развиваются преимущественно в послеполуденные часы. Над морями наиболее благоприятные условия для развития конвекции наблюдаются в ночные часы, и максимум в суточном ходе приходится на 4-5 часов утра.

Фронтальные грозы возникают на фронтальных разделах, т. е. на границах между тёплыми и холодными воздушными массами и не имеют регулярного суточного хода. Над материками умеренного пояса они наиболее часты и интенсивны летом, в засушливых районах – весной и осенью. Зимние грозы возникают в исключительных случаях – при прохождении особенно резких холодных фронтов. Вообще зимняя гроза явление очень редкое.

Грозы на Земле распределены весьма неравномерно: в Арктике они возникают раз в несколько лет, в умеренном поясе в каждом отдельном пункте бывает несколько десятков дней с грозами. Тропики и экваториальная область являются самыми грозообильными районами Земли, и получили название "пояс вечных гроз". В районе Бютензорга, на острове Ява, грозы буйствуют 322 дня в году. В пустыне Сахара гроз вообще почти не бывает. Электрическое строение типичного грозового облака биполярно – положительные и отрицательные заряды располагаются в верхней и нижней частях облака соответственно. Вблизи основания облака под отрицательным зарядом обычно располагается дополнительный



**Рис. 1.20. Грозовой разряд**

положительный заряд. В зависимости от условий (в частности, от широты местности) возможны различные значения верхнего положительного и нижнего отрицательного зарядов.

Электрическое поле в облаках обусловлено распределением объемных зарядов, создаваемых всеми носителями зарядов в данном облаке. В грозовых облаках происходит весьма быстрое накопление больших объемных зарядов. Средняя плотность объемного заряда может составлять порядка  $(0,3-3) \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>. Области с максимальной плотностью зарядов имеют размеры порядка нескольких сотен метров. В таких локальных объемах облака создаются условия, благоприятные для образования молний. По современным представлениям наиболее часто встречаются объемы с максимальной плотностью зарядов (зоны неоднородности) размером 200-400 м. Процесс развития наземной молнии состоит из нескольких стадий. На первой стадии в зоне, где электрическое поле достигает достаточной величины, начинается ударная ионизация воздуха. Свободные электроны, которые всегда имеющиеся в небольшом количестве в воздухе, под воздействием электрического поля приобретают значительные скорости по направлению к земле и, сталкиваясь с атомами воздуха ионизируют их. Таким образом, возникают электронные лавины, переходящие в нити электрических разрядов, представляющие собой хорошо проводящие каналы, которые сливаясь, дают начало яркому термоионизированному каналу с высокой проводимостью – ступенчатому лидеру молнии. Движение лидера к земной поверхности происходит ступенями в несколько десятков метров, со скоростью примерно  $5 \cdot 10^7$  м/сек, после чего его движение приостанавливается на несколько десятков микросекунд, а свечение сильно ослабевает. В последующей стадии лидер снова продвигается на несколько десятков метров. Яркое свечение охватывает при этом все пройденные ступени; затем следуют снова остановка и ослабление свечения. Эти процессы повторяются, при движении лидера до поверхности земли. По мере продвижения лидера к земле напряжение на его конце усиливается и под его действием из выступающих на поверхности Земли предметов выбрасывается ответный стример, соединяющийся с лидером. В заключительной стадии, по ионизированному лидером каналу следует главный разряд молнии. Главный разряд характеризуется токами от десятков до сотен тысяч ампер, яркостью, заметно превышающей яркость лидера, и большой скоростью продвижения, вначале доходящей примерно до  $10^8$  м/сек, в конце уменьшающейся до значений  $10^7$  м/сек. Температура канала при главном разряде может превышать 25 000 °С. Длина канала 1-10 км, диаметр несколько сантиметров. После прохождения импульса тока, ионизация канала и его свечение ослабевают. На рисунке 2.20. показаны три стадии развития молнии. На этом рисунке: 1– грозовое облако; 2 – канал ступенчатого лидера; 3 – корона канала; 4 – импульсная корона на головке

канала; 5 – главный разряд. Принципиально возможны следующие основные пути получения электроэнергии из грозовых разрядов.

Еще в 1928-1933 годы на горе Дженеросо в Швейцарии на высоте 80 м над земной поверхностью подвешивалась металлическая решетка. Во время гроз эта решетка собирала заряд, достаточный для поддержания в течение 0,01 сек электрической дуги длиной в 4,5 м, что соответствовало силе тока в несколько десятков тысяч ампер и разности потенциалов порядка 1 миллиона вольт. Вначале предполагалось получаемое на этой установке напряжение использовать для ускорения заряженных частиц в ускорителях. Однако от этой мысли пришлось отказаться ввиду сильной

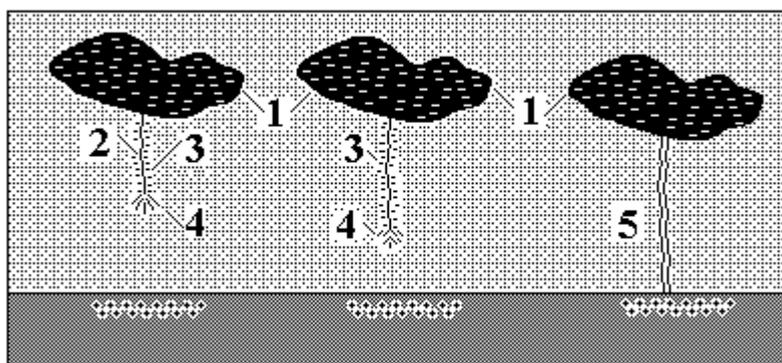


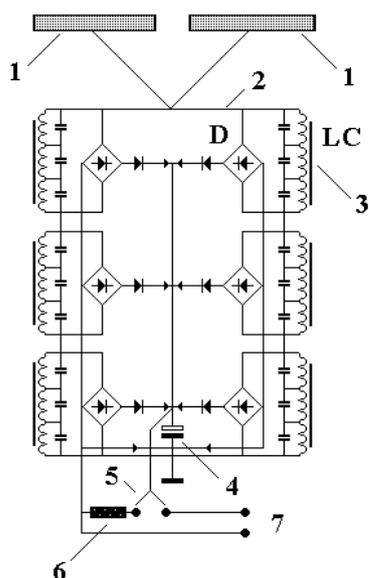
Рис. 2.20. Три стадии развития молнии

изменчивости электрического состояния грозовых облаков и невозможности пока его регулировать. Попытки использовать протекающий во время гроз в поднятых высоко над земной поверхностью антеннах электрический ток для питания ламп накаливания также пока не дали экономически выгодного эффекта.

Известны опыты, когда в результате глубинных взрывов в море, поднимавших фонтаны воды на высоту около 70 метров под грозовым облаком, происходили разряды облаков в море. Также практически были проведены разряды грозовых облаков на поверхность земли (моря) с помощью проволоки, которая доставлялась к облаку ракетой. Обычно разряд происходил, когда ракета поднималась на высоту порядка 100 м. Этого оказывалось достаточным, чтобы разрядить на землю грозовое облако с высотой нижней границы около километра. Были также попытки использовать в целях создания канала для молнии пучок протонов, полученных на синхротроне, а также с помощью лазеров. Основными недостатками указанных методов являются ряд чисто технических трудностей. Имелись проекты рассеивания в облаках металлических или металлизированных пластинок и нитей, играющих роль проводников короткого замыкания и одновременно микроразрядников, на которых вследствие наличия в облаке собственного электрического поля создается падение потенциала, достаточное для коронного разряда. Опыты по засеву облаков кристаллизующими реагентами с целью изменения их электрического состояния показали, что при соответствующих условиях

можно вызвать интенсивную электризацию облака, и один из путей управления электрическим состоянием грозовых облаков связан с управлением процессом кристаллизации. Но результаты подобных воздействий на возможность подучения разряда большой мощности, пока недостаточно определены.

Российские энергетики предложили способ использования энергии молний, заключающийся в улавливании зарядов молнии через молниеприемники, электрически соединенные с токоотводом, заземленные через средство отбора энергии молнии, и утилизации электрической



**Рис. 3.20. Электрическая схема устройства для использования энергии молний**

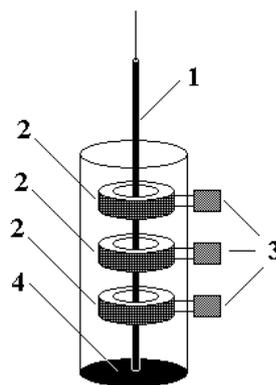
энергии молний на общей накопительной емкости, при этом дополнительно инициируют разряды молнии посредством, например, лазерных излучателей, создающих зоны безэлектродного электрического пробоя воздуха для возбуждения устойчиво развивающегося лидера электрического искрового разряда молнии, а отвод энергии осуществляют через токоотвод, выполненный из резонансных контуров LC-фильтров с диодными мостами.

Электрическая схема, предложенного устройства, показана на рисунке 3.20. На этом рисунке: 1 – молниеприемники; 2 – токоотвод; 3 – трехзвенные резонансные LC-фильтры; 4 – общая накопительная емкость; 5 – автоматический переключатель; 6 – обнуляющее сопротивление; 7 – отвод к потребителю. Каждый молниеприемник выполнен в виде подвешенной над землей металлической сетки, закрепленной на изоляторах. Токоотвод выполнен из более чем двух соединенных

параллельно, последовательно связанных каскадов D, обеспечивающих понижение тока грозового разряда. Каждый каскад выполнен из трехзвенных резонансных LC-фильтров, соединенных между собой общей индуктивной связью. Общая индуктивная связь образована из последовательно соединенных трех обмоток дросселя, а на выходе каждого каскада подключен соответствующий мостовой выпрямитель. При этом выходы мостовых выпрямителей соединены между собой параллельно и подключены к общей накопительной емкости  $C_H$ . «Плюсовые» выходы через выпрямительные диоды подключены к пластине общей накопительной емкости  $C_H$ . «Минусовые» выходы подключены к другой пластине накопительной емкости  $C_H$ , выход с  $C_H$  подключен к системе потребителя. На выходе общей накопительной емкости  $C_H$  установлен автоматический переключатель для соединения с потребителем или

сопротивлением, обнуляющим накопленный заряд с общей накопительной емкости.

Так же предлагалось устройство, в котором в качестве молниеприемника используется вертикальная токопроводящая изолированная от земли труба, внутрь которой вниз дном вставлен толстостенный диэлектрический стакан так, чтобы верхняя часть трубы возвышалась над краями стакана. На внутреннюю поверхность стенок стакана нанесено заземленное токопроводящее покрытие. Труба-молниеприемник электрически соединена с одним концом первичной обмотки трансформатора, другой конец которой заземлен. Индуктивность первичной обмотки и емкость, сформированная токопроводящей трубой, стенками стакана и токопроводящим покрытием, образуют параллельный колебательный контур. Разряд молнии на трубу-молниеприемник инициируется протяженным оптическим пробоем, который формируется пучком импульсного инфракрасного лазера. Конфигурацию и направление греющего пучка формирует управляемое дихроичное зеркало, расположенное внутри стакана. Это зеркало одновременно работает в составе системы оптического сканирования атмосферы, необходимой для выявления известным методом оптической локации зон с критическими градиентами напряжения в нижней части грозовых облаков. Энергия, снимаемая с вторичной обмотки трансформатора, используется для питания всех систем устройства, и часть ее может передаваться потребителям. Устройство для накопления электрической энергии. Устройство, которое позволяет накапливать электрическую энергию, выделяемую в молниеотводе при ударе в него молнии, а также извлекать ее избыток из атмосферы между разрядами молний, показано на рисунке 4.20. На этом рисунке: 1 – металлический громотовод; 2 – тороидальные катушки индуктивности; 3 – согласующие элементы; 4 – заземление. Как видно из приведенного рисунка, это запатентованное устройство, содержит вертикально установленный, заземленный громоотвод. Причем, громоотвод выполнен в виде металлического проводника, вблизи которого расположено одно или несколько элементов для съема электрической энергии. Элемент для съема электрической энергии содержит катушку индуктивности, полупроводниковый элемент и емкость, соединенные последовательно с образованием единого электрического контура. В этом устройстве катушка индуктивности размещена ортогонально любой плоскости, проходящей через ось громоотвода, и выполнена в виде тороида, ось симметрии которого совпадает с осью громоотвода.



**Рис. 4. 20. Устройство для накопления электрической энергии**

Китайские ученые из института атмосферной физики разработали несколько иную технологию использования энергии молнии. Для захвата молнии будут использоваться оснащенные специальными громоотводами ракеты, которые будут запускать в центр грозового облака. Ракета "YL-1" должна стартовать за несколько минут до удара молнии. "Проверки показали, что точность запусков составляет 70%", – сообщили разработчики аппарата. Энергия молнии, а также производимое ей электромагнитное излучение будут использоваться для генной модификации сельскохозяйственных пород и производства полупроводников. Кроме того, новая технология позволит значительно снизить экономический ущерб от гроз.

Американская компания Alternative Energy Holdings (Alt-Holding), предложила еще один, способ использования даровой энергии. Специалисты компании утверждают, что им удалось разработать способ сбора и утилизации энергии, возникающей во время электрических разрядов в грозовых облаках. Проект получил название «Сборщик молний» (Lightning Harvester).

Начиная с 2006 года издание eVolo стало проводить ежегодный конкурс eVolo Skyscraper Competition, в котором принимают участие архитекторы, проектирующие не просто высотные здания, а небоскребы строящиеся по последним технологиям и с широким использованием самых современных материалов. Кроме того организаторы конкурса оценивают представленные проекты и с точки зрения их экологичности, которой уделяется особое внимание. Так, в нынешнем году на Evolo Skyscraper Competition 2011 призовые места заняли проекты «LO2P Recycling Skyscraper» (небоскреб-утилизатор в Индии), «Flat tower» (альтернативная энергетика) и гидротехническая плотина, совмещающая в себе электростанцию, галерею и аквариум. На этом же конкурсе группой архитекторов и инженеров из Сербии был представлен неординарный проект небоскреба производящего водород с помощью «небесного» электричества. Идея сербской команды оказалась настолько интересной, что проект Хидра был отмечен поощрительной премией, но вот занять одно из призовых мест. На самом деле, небоскреб Хидра представляет собой проект высотного строения, которое будет ловить молнии из проходящих в районе грозовых фронтов. Далее предполагается использовать их энергию для процесса разделения (электролиза) обычной воды на составляющие – водород и кислород. Таким образом, это строение будет с одной стороны служить источником чистой энергии, а с другой, станет еще одним поставщиком кислорода в атмосферу Земли.

Учитывая непредсказуемость и непостоянство молний, авторы проекта предложили несколько решений, которые помогут повысить производительность «небоскреба» Хидра. Чтобы притягивать к себе как можно большее число грозовых разрядов, конструкцию необходимо установить в тех регионах планеты, где наблюдается наибольшее число

молний. К таким областям относятся некоторые районы, находящиеся на территории США (штат Флорида), Венесуэлы, Колумбии, Индии (в северной части этих стран), Индонезии (полуостров Малакка) и Конго (Африка). В этих районах на каждый квадратный километр территории приходится от 50-70 и более ударов молний ежегодно. Кроме правильного выбора места под строительство, повысить вероятность удачной охоты за молниями поможет возведение проекта Хидра на открытой местности. Поэтому, если небоскреб будет располагаться в крупном городе, он должен стать самым высоким строением в мегаполисе. Иначе часть молний будет просто притягиваться соседними более высокими небоскребами или башнями. Как, например, это наблюдается с Эмпайр-стейт-билдинг (самое высокое здание Нью-Йорка) только в который каждый год ударяет около 20 молний.

Помимо сложности заранее предсказать, сколько же молний сможет улавливать сербский «небоскреб», у проекта существует и масса других трудноразрешимых проблем. Это и большие рабочие температуры (до 27 000 °С) и огромная сила тока (до 200000 А) разрядов молний, которые будут предъявлять высочайшие требования к используемым материалам, и также необходимость создания конденсаторов огромной емкостью и с еще невиданными характеристиками.

Однако прежде, чем атмосферное электричество попадет в промышленную сеть, оно должно быть преобразовано в промышленный стандарт: переменный ток частотой 50 - 60 герц с напряжением 220 - 550 вольт (для энергосетей разных стран эти параметры отличаются). То есть, не достаточно просто направить разряд молнии на накопитель. В разное время предлагались разные решения этой проблемы, в том числе и подземные водяные резервуары. Под действием энергии электрического разряда, вода должна превращаться в пар, который, по мысли авторов патента (а такая схема запатентована в США в 60 годы прошлого века) должен вращать лопасти турбин, как на классических тепловых и атомных станциях. Но КПД таких генераторов крайне не велик. В настоящее время разработаны мощные электрические конденсаторы - накопители большой емкости, способные месяцами хранить накопленную энергию и преобразователи переменного тока на быстродействующих тиристорах, КПД которых приближается к 85%. Вторая проблема заключается в относительной непредсказуемости гроз и неравномерном их распределении. Конечно, наибольшая грозовая активность отмечается ближе к экватору, но возникающие в этих широтах разряды чаще всего происходят не между грозовым облаком и землей, а между облаками или частями облака. Конечно, в Центральной Африке есть обширная зона, где на квадратный километр приходится более 70 молний в год. Есть такие зоны и в США: в штатах Колорадо и Флорида. Но все-таки это достаточно локальные районы. Между тем, атмосферное электричество теоретически, доступно в любой точке планеты.

Специалисты, работающие с американским спутником «Миссия измерения тропических штормов» (Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM), опубликовали отчет об одном из своих недавних достижений. Проведя многолетние наблюдения, TRMM составил мировую карту частоты молний, в соответствии с числом ослепительных разрядов, возникающих над каждым квадратным километром данной местности за год. В центральной части Африканского континента есть зона, где на квадратный километр приходится более 70 молний в год. Именно там запланировано строительство «молниевоего» завода. При этом разработчики считают, что электростанция «на молниях» окупится за 4-7 лет.

Следует отметить, что, несмотря на достаточно хорошо изученную природу образования и формирования грозовых разрядов, со временем появляются новые экспериментальные данные. Так, в 1989 году был обнаружен их новый вид – высотные электрические разряды, или спрайты. Эти разряды образуются в ионосфере и бьют сверху вниз, по направлению к грозовым облакам на расстояние 40-50 км, но исчезают, не достигая их. Еще более странные молнии наблюдали ученые из Тайваньского национального университета имени Чена Куна во время нескольких гроз над Южно-Китайским морем в 2002 году. Разряды атмосферного электричества били не вниз, а вверх – от грозовых облаков в верхние слои атмосферы. Разветвленные молнии имели гигантские размеры: светящиеся зигзаги длиной 80 км уходили ввысь на 95 км. Разряды продолжались менее секунды и сопровождались низкочастотным радиоизлучением.

### **Контрольные вопросы**

Какое природное явление называется «гроза»?

За счет, какого явления происходит электризация облаков?

Каков процесс развития наземной молнии?

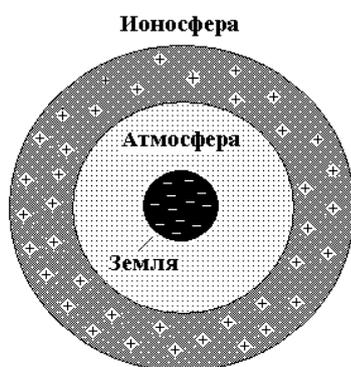
Какие, принципиально возможные методы, получения электроэнергии из грозовых разрядов?

Какие устройства, предлагалось использовать в качестве молниеприемника?

В каких районах нашей планеты наблюдается наибольшее число молний?

В каких странах мира начинается использование энергии молний?

**Лекция 21.**  
**Использование энергии атмосферного электричества.**



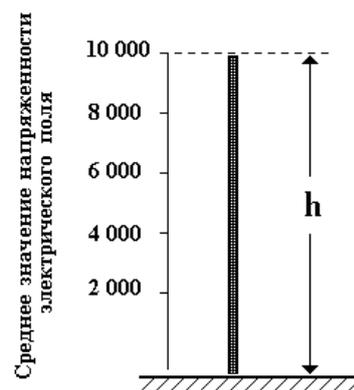
**Рис.1.21. Атмосфера  
Земли, как диэлектрик  
сферического**

**конденсатора.** Все многообразие электрических явлений, происходящих в атмосфере Земли, дает, получившая наибольшее распространение в настоящее время, теория Пельтье-Экснера. Согласно этой теории, земной шар содержит большой избыток отрицательного электричества, которым заряжены и все находящиеся на нем предметы. Отсюда следует, что электрическое поле, окружающее Землю, должно иметь отрицательный потенциал, постепенно уменьшающийся по мере удаления вверх от поверхности. Если принять потенциал на поверхности Земли равным нулю, то в атмосфере будет постепенно возрастающий положительный заряд, что действительно и наблюдается в высоких слоях атмосферы. В слоях же, близких к поверхности Земли, постоянно присутствующие в атмосфере пары воды и пыль, наэлектризованные отрицательно, должны уменьшать напряженность поля и нарушать правильность его распределения. Согласно этой теории суточный и годовой ход атмосферного электричества находится в зависимости от количества паров, заключающихся в атмосфере. Следует отметить, что до недавнего времени атмосферный воздух считался очень хорошим диэлектриком, и лишь работы новейшего времени показали, что воздух при некоторых особых условиях становится проводящим (при нагревании, при разреживании, под действием ионизирующего излучения и т.д.). Электрические токи воздуха временами достигают и в средних широтах значительной силы, особенно же они велики в полярных странах. В конце восьмидесятых годов прошедшего столетия было открыто и изучено явление электроактивности. Это явление состоит в том, что под влиянием ультрафиолетовых лучей проводник, заряженный отрицательным электричеством, быстро теряет свой заряд. В атмосферных явлениях это проявляется в том, что действие ультрафиолетовых лучей, заключающихся в солнечном спектре, способствует переходу отрицательного заряда Земли в атмосферу. Исследования показали, что актиническая радиация имеет годовой и суточный ход, обратный ходу потенциала, как это и нужно было ожидать. В терминах статического электричества, наша планета представляет собой подобие сферического конденсатора, заряженного примерно до 300 000 вольт. Внутренняя сфера – поверхность Земли – заряжена отрицательно, внешняя сфера – ионосфера – положительно. Изолятором служит атмосфера Земли. На рисунке 1.21. условно показан такой сферический конденсатор.

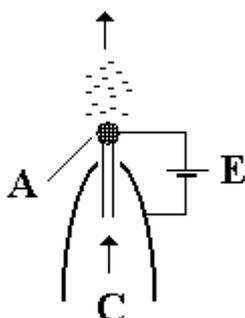
Напряжённость электрического поля нашей планеты составляет у поверхности примерно 130 в/м. С высотой напряженность этого поля падает. На высоте 10 км значение напряженности поля составляет около 3% от его значения у поверхности Земли. Через атмосферу постоянно протекают ионные и конвективные токи утечки конденсатора, которые достигают многих тысяч ампер. Но, несмотря на это разность потенциалов между обкладками конденсатора не уменьшается. Чтобы воспользоваться энергией этого заряженного конденсатора, нужно как то подключить к

нему потребитель энергии. Для подключения к отрицательному полюсу – к Земле достаточно сделать надежное заземление. Подключение к положительному полюсу генератора - к ионосфере – является сложной технической задачей, решением которой занимаются многие исследователи. Один из проектов по использованию энергии атмосферного электричества заключался в следующем. На поверхности Земли устанавливается металлическая мачта с хорошим заземлением. Конструкция такого устройства показано на рисунке 2.21. При высоте мачты  $h=100$  метров, разность потенциалов между Землей и верхушкой мачты будет численно равна примерно 10 000 вольт. Под

воздействием внешнего электрического поля отрицательные заряды (электроны) начинают двигаться вверх, к верхушке мачты, создавая там избыток отрицательных зарядов. А избыток отрицательных зарядов на верхушке мачты создаст свое электрическое поле, направленное навстречу внешнему полю. Наступает момент, когда эти поля сравняются по величине, и движение электронов прекращается. Это значит, что в проводнике, из которого сделана мачта, электрическое поле равно нулю. Однако, если каким либо способом удалять электроны с вершины мачты, то электрическое поле внутри мачты не будет скомпенсировано и в ней постоянно будет течь ток. В этом случае достаточно разрезать мачту в любом месте и включить туда нагрузку. Для удаления избыточных электронов предлагалось несколько способов. Один из таких способов заключается в следующем. Если обдувать потоком пара заряженную отрицательно металлическую пластину, то пар будет захватывать с поверхности пластины часть свободных электронов и уносить их с собой. Предлагаемая конструкция показана на рисунке 3.21. На этом рисунке: С – струя пара; Е – источник напряжения; А – ионизирующий изолированный электрод. Эмиттер представляет собой щелевое сопло, на котором помещен изолированный электрод А. На этот электрод подается положительный потенциал от источника Е. Проходящий через сопло пар, срывает



**Рис. 2.21. Разность потенциалов между землей и верхушкой мачты**



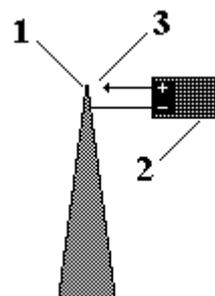
**Рис. 3.21. Один из вариантов эмиттера** электроны с краев сопла и уносит их в атмосферу. Таким образом, электрод А, с положительным потенциалом на нем является своего рода активирующим электродом. Меняя потенциал на этом электроде, можно добиться нужной величины силы тока эмиттера.

На рисунке 4.21. показана принципиальная схема другого эмиттера. На этом рисунке: 1 – вертушка мачты; 2 – генератор высоковольтных импульсов; 3 – искровой промежуток. Этот эмиттер основан на получении искрового разряда. От генератора высоковольтных импульсов отрицательные импульсы подаются на мачту, а положительные – подаются на электрод, который образует искровой промежуток с вертушкой мачты. Главное достоинство такого устройства – возможность регулировать ток эмиттера с помощью частоты разрядов, величины искрового промежутка. Но существует один недостаток – искровые разряды создают радиопомехи. Поэтому вертушку мачты с искровыми промежутками нужно экранировать цилиндрической сеткой, обязательно изолированной от мачты. Эмиттер может быть построен также

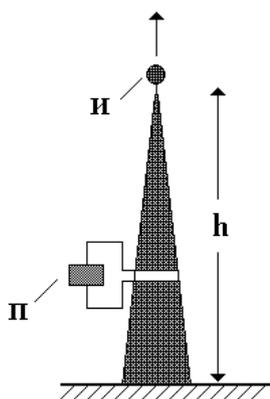
на базе высоковольтного генератора небольшой мощности, который способен создать коронный разряд вокруг излучающего электрода на вертушке проводника. Такие высоковольтные генераторы используются в промышленности в

дымоулавливателях, ионизаторах воздуха, установках для электростатической окраски металлов и различных бытовых приборах. Генератор создает вокруг излучателя коронный или кистевой разряд. Такой разряд является проводящим плазменным каналом, по которому электроны проводимости свободно уходят в атмосферу уже под действием электрического поля Земли. На рисунке 5.21. показано устройство электрической станции, использующей атмосферное электричество. Существуют и другие проекты. В качестве примера можно привести электростатический генератор Ефименко. В его установке цилиндрический ротор вращается в потенциальном электрическом поле, создавая с помощью обычного динамо мощность около 70 Вт. Источником поля ( $\approx 6000$  В) служит электрическое поле Земли, для чего установка имеет антенну и заземление.

Исследование Фернандо Галембека (Fernando Galembek), представленное на 240-й встрече Американского химического общества (ACS), посвящено вопросам формирования электрических зарядов в атмосфере. Практическим применением полученных результатов, по словам



**Рис. 4.21. Схема искрового эмиттера**



**Рис. 5.21. Устройство электростанции, использующей атмосферное электричество**

ученого, могла бы стать утилизация атмосферного электричества. Атмосферное электричество образуется, в частности, когда водяной пар конденсируется на частицах пыли, взвешенных в воздухе. Но, по словам Галембека, ученые до сих пор не имеют достаточных знаний о процессах формирования заряда и его «жизненном цикле», который иногда завершается вспышкой молнии. Ранее считалось, что капли воды в атмосфере остаются электрически нейтральными даже после контакта с заряженными частицами пыли и других жидкостей. Однако новые данные свидетельствуют, что это не так. Галембек и его коллеги экспериментально подтвердили идею о том, что на самом деле частицы воды в атмосфере являются

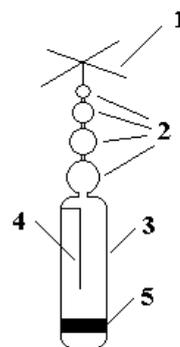
носителями электрического заряда. Исследователи использовали частицы кремнезема и фосфата алюминия, которые часто содержатся в воздухе в виде пыли, чтобы смоделировать контакт частиц воды и взвешенных веществ. Оказалось, что при повышенной влажности кремний приобретает большой отрицательный заряд, а фосфат алюминия - большой положительный заряд, чем в сухой атмосфере. «Вода в атмосфере может выступать в роли носителя электрического заряда и передавать его другим веществам, с которыми вступает в контакт» – объясняет Галембек. Мы называем это «гигроэлектричество». В будущем будет возможно создать коллекторы, которые собирают гигроэлектричество и направляют его на нужды офисов и жилых домов. Подобно тому, как солнечные батареи наилучшим образом работают в районах с преимущественно ясной погодой, «грозовые батареи» будут эффективны во влажных регионах, например, в тропиках.

Группа Галембека тестирует различные материалы для выявления тех из них, которые можно будет использовать с наибольшей эффективностью для утилизации атмосферного электричества. Однако, по словам ученого, до практической реализации идеи устройства, собирающего гигроэлектричество, еще далеко.

Учеными из научно-исследовательского института Электрификации сельского хозяйства России удалось преобразовать энергию статического электричества в электроэнергию, используемую нами повседневно. Основой для этого служит люстра Чижевского, которая генерирует статическое электричество за счет ионизации воздуха. В результате исследований, проведенных в лаборатории института, была разработано устройство, которое служит преобразователем аккумулирующим поток энергии, исходящий от люстры. Полученный поток по проводам перенаправляется в разработанный блок и на выходе получается электричество напряжением около 40 вольт. По заявлению ученых их НИИ электрификации сельского

хозяйства, можно получить напряжение и больше. Для этого необходимо с шара, подвешенного над землей, снимать статическое электричество, которое впоследствии, разработанный прибор преобразует в обычное электричество.

В одном из проектов разрабатываемой системы для использования атмосферного электричества, для повышения эффективности предлагается использовать куполообразные трибоэлементы, которые дополнительно электризуются под воздействием дождя, метели или снегопада. (Трибо – от греческого слова – трение, трибоэлемент – устройство, которое электризуется за счет механического трения, степень электризации тем больше, чем больше поверхность взаимодействующих тел). Это предлагаемое устройство содержит несколько вертикально ориентированных и сообщающихся между собой куполообразных элементов, к кромке нижнего из которых присоединен игольчатый электрод разрядника, а другой его электрод выполнен в виде заземленного металлического диска. Конструкция этой системы проказана на рисунке 6.21. На этом рисунке: 1– приемная крестообразная антенна; 2 – куполообразные трибоэлементы; 3– игольчатый электрод разрядника; 4– корпус; 5 – заземленный металлический диск. Камера конденсатора выполнена в виде тела вращения с конической верхней частью. Корпус изготовлен из диэлектрического материала. На вершине корпуса размещена нижняя металлическая террела – трибоэлемент, имеющая длинный металлический "нос", на котором жестко закреплены последовательно (посредством металлического "носа") соединенные между собой трибоэлементы, полости которых и камеры сообщены. На верхнем трибоэлементе закреплена крестообразная антенна. От кромки нижнего трибоэлемента вертикально опускается игла. На основании камеры расположен нижний дискообразный металлический электрод, имеющий заземление. Устройство работает следующим образом. Террелы-

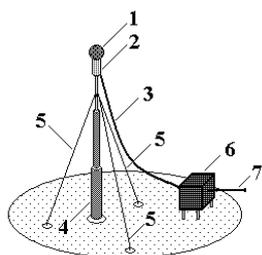


**Рис. 6. 21.**  
**Установка с трибоэлементами**

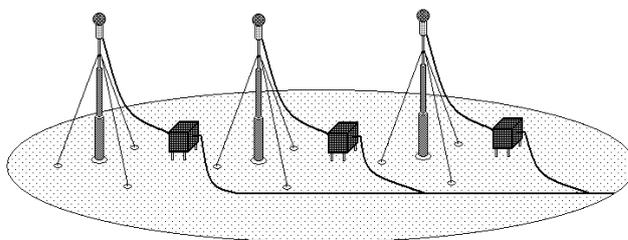
трибоэлементы, расположенные вертикально и соединенные с антенной крестообразной формы, позволяют при минимуме объема создать максимальную поверхность для осуществления трибоэлектризации различными атмосферными факторами. В результате возникает разница потенциалов между верхним электрически заряженным игольчатым электродом и нижним электродом. В период метелей, дождя, гроз процесс накопление электрических зарядов значительно усиливается за счет использования развитой поверхности трибоэлементов. Установка функционирует в любую погоду, усиливая действие в период гроз, а также при расположении на возвышенном месте вблизи водоема, где электрическая заряженность облаков увеличивается. По мнению авторов,

предложенное устройство открывает возможность получения в значительных количествах электрической энергии из атмосферы.

На рисунке 7.21 показано отдельное устройство для аккумуляции атмосферного электричества. На этом рисунке: 1– приемник; 2– изолятор; 3–высоковольтный кабель; 4 – мачта; 5 – оттяжки мачты; 6 – преобразователь напряжения; 7– отвод к потребителю. На рисунке 8.21. показано устройство проектируемой энергетической станции, состоящей из нескольких устройств для аккумуляции атмосферного электричества.

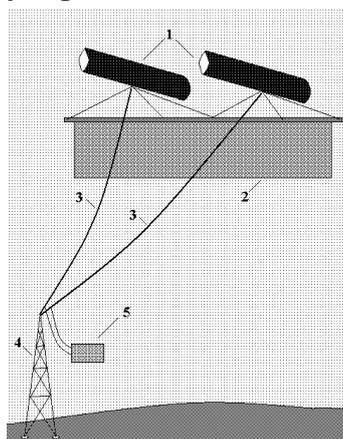


**Рис. 7.21 Устройство для аккумуляции атмосферного электричества**



**Рис. 8.21. Устройство энергетической станции для аккумуляции атмосферного электричества**

Способ аккумуляции атмосферной электроэнергии с помощью летательных аппаратов. Этот способ реализуется с помощью запуска летательного аппарата и передачи электроэнергии через проводящий канал, электрически связанный с накопителем электроэнергии. В качестве летательного аппарата предлагается использовать аэростат. Этот аэростат помещается в электропроводящую оболочку сферической формы и удерживается, на высоте наибольшего количества атмосферной



**Рис. 9.21. Первые эксперименты по аккумуляции атмосферного электричества**

электроэнергии, посредством троса из диэлектрического материала. Значение необходимой высоты определяется показанием амперметра. В качестве накопителя электроэнергии используется емкостной накопитель. Электроэнергия, аккумулированная электропроводящей поверхностью оболочки аэростата, передается на емкостной накопитель при помощи электропровода. Следует отметить, что впервые опыты с аккумуляцией атмосферной электроэнергии были выполнены в 1921 году. Герман Плаусон, в Финляндии провел эксперименты с аэростатами, изготовленными из тонких листов магниево-алюминиевого сплава, покрытого очень острыми, электролитическим способом изготовленными иглами.

На рисунке 9.21. показано, разработанное им устройство с двумя аэростатами. На этом рисунке: 1 – аэростаты; 2 – металлическая сетка; 3 – металлические тросы; 4 –деревянная башня; 5 – накопители электроэнергии.

Плаусон получил мощность 0,72 кВт от одного аэростата и 3,4 кВт от двух, поднятых на высоту всего лишь 300 м. На свои устройства он в 1922–24х годах получил патенты США, Великобритании и Германии. В настоящее время имеется много проектов с использованием аэростатов. Один из таких проектов заключается в запуске в атмосферу группы аэростатов, способных притягивать электричество. Эти аэростаты соединяются электропроводами, которые также закрепляют аэростаты шары на земле в резервуарах, содержащих раствор воды и электролита. Если такая группа аэростатов поднимется достаточно высоко, до нижних ионизированных слоев атмосферы, постоянный электрический ток потечет по проводу через растворенный электролит, что приведет к разложению воды на водород и кислород. Далее эти газы можно будет собрать так же, как в любом другом электролитическом устройстве.

В начале 60–х годов XX века был выдвинут проект использования «электрических течений», обнаруженных в верхних слоях атмосферы. В соответствии с этим проектом, на вершине горы устанавливаются мощные горелки. В топливо добавляются ионизирующие вещества, например соединения калия. При этом возникает высокий столб ионизированного газа – хорошего проводника электричества. Над горелками устанавливается медная сеть с крупными ячейками, закрепленная на изоляторах. Вся конструкция заземляется. Авторы проекта полагали, что «ионотрон» даст в сотни раз более дешевую энергию, чем от сжигания угля. Но, по соображениям экологии, в настоящее время этот проект не реализован. Сегодня ионный канал можно создать и иным способом. Например, с помощью направленного источника радиоактивного излучения – такие идеи предлагались, и более того, громоотводы такой конструкции использовались для грозовой защиты объектов особой важности. Однако, изотопные громоотводы, хотя и способны инициировать разряд молнии, проблемы стабильности и предсказуемости разрядов не решают. Между тем, решение проблемы, как кажется, существует. Способ заключается в предварительном сканировании грозовой тучи лазерным лучом небольшой мощности с целью выявления области наибольшей напряженности электростатического поля. После сканирования лазер ориентируется в эту область. Мощный лазерный луч, проходящий через отверстие в токоприемнике, создает плазменный канал между тучей и землей, по которому устремляется электрический ток. Заряд облаков стекает по плазменному каналу на токоприемник и передается по токовому накопителю энергии. Помимо прочего, такая установка позволит также хорошо выполнять молниезащитную функцию для различных объектов без использования опасных высокоактивных материалов.

### **Контрольные вопросы**

Какие существуют проекты по использованию энергии атмосферного электричества?

Что называется – «трибоэлементы»?

В чем заключался способ аккумуляции атмосферной электроэнергии с помощью летательных аппаратов?

В чем заключался проект использования «электрических течений»?

Какими способами можно создать ионный канал в атмосфере?

В чем заключаются недостатки проектов использования энергии атмосферного электричества?

## Лекция 22.

### Использование энергии постоянных магнитов.

Постоянный магнит – изделие, изготовленное из ферромагнитного материала, способного сохранять остаточную намагниченность после выключения внешнего магнитного поля.

Свойства магнита определяются характеристиками размагничивающего участка петли магнитного гистерезиса материала магнита: чем выше остаточная индукция  $B$  и коэрцитивная сила  $H$ , тем выше намагниченность и стабильность магнита. Характерные поля, создаваемые постоянными магнитами – до 1 Тл. Как показали долговременные исследования, коэрцитивная сила постоянных магнитов со временем изменяется крайне незначительно (в пределах от нуля для магнитов из редкоземельных материалов до 3% для магнитов “Алнико” за  $10^4$  часов испытаний). Это означает, что если постоянный магнит хранится вдали от линий электропередачи, других магнитов, высоких температур и других факторов, которые неблагоприятно на него влияют, он навсегда сохранит свои магнитные свойства.

Способность постоянных магнитов совершать полезную внешнюю работу (например, поднимать металлические предметы) была известна давно. Однако лишь недавно постоянные магниты стали использоваться применяются в качестве преобразователей энергии. В качестве примера на рисунке 1.22. показан простейший маятниковый магнито – гравитационный двигатель с двумя магнитами. На этом рисунке 1 – подвижные магниты; 2 – возвратно-поступательная пружина; 3 – полая немагнитная трубка; 4 – упоры; 5 – неподвижные постоянные магниты. Под действием сил отталкивания одноименных магнитных полюсов подвижный магнит 1 начинает совершать циклические колебания в вертикальной плоскости. На левой части рисунка показано положение элементов этой простейшей магнитомеханической системы в верхней точке подъема маятника за счет

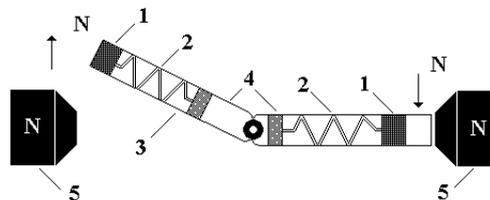
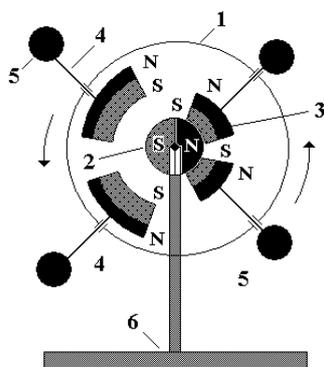


Рис. 1.22. Простейший маятниковый магнито - гравитационный двигатель

энергии магнитных полей силами отталкивания двух магнитов 1 и 5. Вначале левая часть устройства приподымается, вместе с полый трубой 3 вверх, и, отталкивается от магнита 5. При этом он одновременно взводит пружину внутри трубы (крайнее положение левого магнита 1 и сжатой пружины 2). Далее, под действием силы тяжести труба вновь устремляется вниз и при распрямлении пружины вновь возрастает сила отталкивания магнитов, и процесс циклически повторяется. Таким образом, данное магнито – гравитационное устройство совершает комбинированное колебательное и обратно поступательное перемещение магнита 1 относительно магнита 6, т.е. совершает прямое преобразование магнитной энергии в механическую энергию. Еще одна конструкция магнито – гравитационного двигателя вращения показана на рисунке 2.22. Это устройство содержит не магнитный цилиндра –1, закрепленный на горизонтальной оси вертикальной опоры – 5. Снаружи этой оси и внутри обода размещен цилиндрический магнит – 2 с радиальной намагниченностью и осью магнитного экватора, совпадающего с вертикальной осью опоры –5. Внутри обода - ротора размещен дуговой постоянный магнит –3, который имеет с внутренней радиус, примерно равный внешнему радиусу магнита 2. На подвижных радиальных осях – 4, закреплены металлические шары–5. Для повышения энергетической эффективности такого мотора вводится еще и пружинный накопитель механической энергии – размещаемый на оси 4 между ободом 1 и магнитом 3.



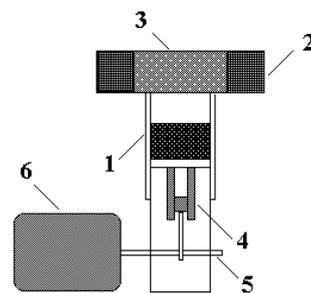
**Рис. 2 22. Магнито - гравитационный двигатель с вращением магнитов**

Колличество таких пружинно-магнитных штоков может быть и больше. В этом случае они размещаются на ободе 1 симметрично. Такая конструкция только повысит мощность мотора при неизменных габаритах. Для запуска этого мотора необходимо сделать несколько начальных оборотов обода 1 пусковым устройством. Далее мотор работает уже автономно. Вращение ротора обусловлено тем, что момент вращения дискового ротора, обусловленный суммой сил гравитации и магнитного отталкивания магнитов на разгонном левом участке траектории ротора, больше чем тормозящий момент при подъеме груза 5. Разность моментов возникает из - за различных радиусов вращения грузов 5– на левом полуобороте обода 1 шток 4 выдвигается, а на правом полуобороте обода 1 шток вдвигается. Регулирование мощности и скорости ротора достигается поворотом центрального цилиндрического магнита вокруг оси или изменением рабочих зазоров между магнитами. Чем больше магнитная индукция постоянных магнитов и выше их масса – тем выше механическая мощность такого мотора. Естественно, суммарная

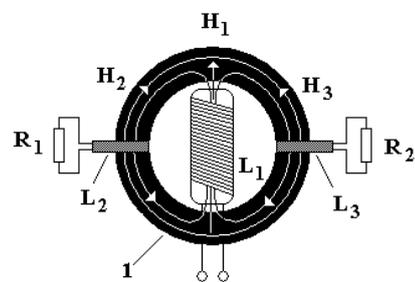
механическая мощность и вырабатываемая суммарная энергия генератора не превышают мощности и энергии взаимодействия магнитов и гравитационных сил. Однако приведенные устройства служат лишь для демонстрации возможности использования постоянных магнитов. Для преобразования потенциальной энергии постоянного магнита в электрическую энергию разработано и предложено много вариантов двигателей, использующих в качестве рабочих тел постоянные магниты. Генерация электрической энергии, в таких устройствах, основана на использовании энергии магнитного поля ферромагнетиков в процессах намагничивания-размагничивания магнитной цепи. В качестве ферромагнетика могут быть использованы ферриты, электротехническая сталь, сплавы, аморфное железо, порошки из доменов постоянного магнита и пр.

Многочисленные исследования показали, что силовое взаимодействие ферромагнитного сердечника и постоянного магнита может быть в значительной степени промодулировано управляющим сигналом небольшой мощности, вызывающим изменение магнитной проницаемости. Это можно использовать для создания двигателей, использующие в качестве рабочих тел постоянные магниты. В качестве примера рассмотрим устройство, показанное на рисунке 4.23.

Здесь 1 – постоянный магнит, размещенный в корпусе из немагнитного материала; 2– обмотка; 3 – ферромагнитный сердечник; 4 – кривошипно-шатунный механизм; 5 – вал электрогенератора; 6– электрогенератор. Как видно из рисунка, постоянный магнит, цилиндрической формы, закреплен на кривошипно-шатунном механизме. Сближение магнита и ферромагнитного сердечника происходит за счет магнитного взаимодействия, без затрат мощности от первичного источника. После прохождения магнитом «верхней мертвой точки», материал



**3.22. Устройство для использования энергии постоянного магнита**

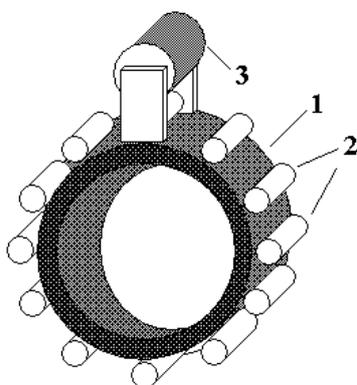


**Рис 4.22. Устройство генератора Фролова**

ферромагнитного сердечника перемагничивается импульсом тока от схемы управления. Изменение направления магнитного поля сердечника обеспечивает ускоренное движение магнита вниз. Генератор, соединенный с валом кривошипно-шатунного механизма, обеспечивает получение электрической мощности. Габариты не более 900x400x200 мм. Одним из первых

устройств, использующих энергию постоянных магнитов, был "генератор Грамма". В нем в полюсах неподвижного постоянного магнита размещался вращающийся кольцевой ротор с тороидальной обмоткой, которая касалась

двух диаметрально расположенных контактных щеток. "Ассиметрия" процессов намагничивания и размагничивания кольцевого ротора достигалась смещением момента подачи напряжения на тороидальную обмотку. Значительно позднее (в 1996 году) российский инженер А. Фролов усовершенствовал генератор Грамма. Упрощенное устройство этого генератора показано на рисунке 4.22. В его конструкции неподвижным было кольцо – 1 с обмотками  $L_2$  и  $L_3$ , а в качестве источника переменного магнитного поля использовалась еще одна обмотка  $L_1$ , расположенная в центре. При этом два магнитных потока от двух катушек нагрузки взаимно компенсируются, и, таким образом, в первичной цепи реакция отсутствует. В 2003 г. С. Хартман сконструировал тороидальный генератор, ток на выходе которого составлял – 40 А при напряжении 6,5 В. В литературе достаточно широко описаны генераторы тока, основанные на использовании эффекта "самоподдерживающегося вращения". В 50-х годах прошлого столетия Дж. Серл обнаружил необычное взаимодействие постоянного магнита с магнитными роликами, расположенными на его поверхности, выражающееся в самопроизвольном качении роликов после придания одному из них небольшого импульса. Этот эффект с позиций энергодинамики может быть объяснен явлением "запаздывания потенциалов", которое в средах с перемагничиванием и реполяризацией возникает уже при относительно небольших скоростях взаимного движения магнитов. Он обусловлен различием сил притяжения и отталкивания магнитов при их относительном движении. На этом эффекте сконструирован генератор, который может рассматриваться как электродвигатель, состоящий только из постоянных магнитов цилиндрической формы и неподвижного кольца. На рисунке 4.22. показан генератор простейшей формы, состоящий из неподвижного кольцевого магнита –1, называемого основанием, и некоторого количества цилиндрических магнитов, или роликов –2. В процессе работы каждый ролик вращается вокруг своей оси и одновременно вращается вокруг основания таким образом, что любая



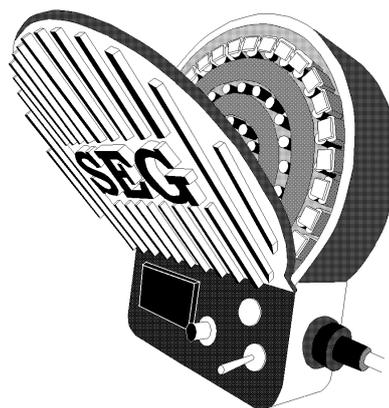
**Рис. 5.22. Упрощенная схема генератора Серла**

фиксированная точка на боковой поверхности ролика описывает циклоиду с целым числом лепестков. Для съема энергии, по окружности основания размещены электромагнитные преобразователи в виде С-образных магнитов с обмоткой, при пересечении которых магнитными роликами возникает электродвижущая сила. Измерения показали, что возникает электрический потенциал в радиальном направлении. Основание заряжается положительно, а ролики – отрицательно. В принципе, генератор не нуждается в какой-либо armature для поддержания механической целостности, так как ролики притягиваются к кольцу. Тем не менее, при использовании генератора для

механической работы должны использоваться валы для передачи момента. Более того, если генератор смонтирован в корпусе, ролики должны быть несколько короче высоты основания для предотвращения задевания о корпус или другие части. При работе создаются зазоры в результате электромагнитного взаимодействия между кольцом и роликами, предотвращающие механический и гальванический контакт между основанием и роликами и уменьшающие трение до ничтожной величины. Эксперименты показали, что выходная мощность увеличивается с ростом количества роликов и для достижения плавного и надежного вращения отношение диаметра основания к диаметру ролика должно быть целым положительным числом, большим, чем 12. Более сложная конфигурация может быть образована путем добавления дополнительных секций, состоящих из основного кольца и соответствующих роликов.

В России эффект Серла исследовался в Институте высоких температур РАН. Сотрудники этого института В. Рощин и С. Годин в 1992 г. построили подобный серловскому генератор, который они назвали “магнитодинамическим конвертером”. Он представлял собой статор с секторными постоянными магнитами и кольцевой ротор с вращающимися магнитными роликами. Диаметр ротора составлял 1 м., а его масса - 500 кг. Сегменты ротора выполнены на основе редкоземельных магнитов с остаточной индукцией 0,85 Тл. Они намагничивались путём разряда батареи конденсаторов через индуктор. “Зацепление” роликов с кольцевым магнитом ротора осуществлялось по принципу шестерен размещением в статоре и роликах поперечных магнитных вставок из NdFeB с остаточной индукцией 1,2 Тл. Между поверхностью статора и роликами был оставлен воздушный зазор 1 мм. По окружности ротора были также размещены электромагнитные преобразователи в виде С-образных магнитов с обмоткой, которые замыкались роликами, при пересечении которыми магнитопроводов возникала электродвижущая сила (ЭДС). Одновременно на валу ротора был установлен обычный электрогенератор, а также электродвигатель для первичной раскрутки ротора. Установка запускалась в действие путём раскрутки ротора с помощью электродвигателя. Максимальная отводимая мощность в установке составила 7 кВт.

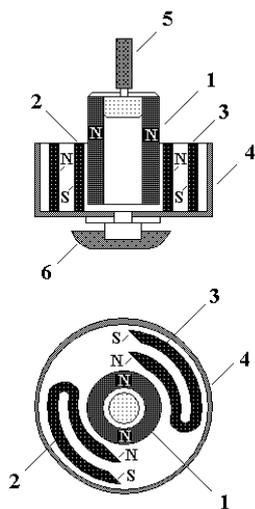
Недавно швейцарская фирма SEG объявила о выпуске на рынок генератора, работающий на эффекте Серла. Это компактный, 15-ти киловаттный генератор, с размерами примерно 46×61×12 см, который можно настроить для выработки постоянного или переменного тока различного напряжения в диапазоне от 12 до 240 В. Каждый такой генератор способен выработать 60 МВт/ч энергии, прежде



**Рис. 6.22. Внешний вид генератора Серла**

чем встанет необходимость в его перемагничивании. Предлагаемая модель генератора “D15AP” состоит из трех четырехслойных концентрических колец, каждое из которых изготовлено из композита. Эти кольца расположены по отношению друг к другу концентрически и прикреплены к основанию. Вокруг каждого кольца свободно вращаются ролики в количестве 10 штук вокруг первого кольца, 25 – вокруг второго и 35 – вокруг третьего. За роликами, расположенными по диаметру внешнего кольца, находятся катушки, соединенные различными способами, что дает возможность вырабатывать либо постоянный, либо переменный ток различного напряжения. Выходные катушки должны быть рассчитаны таким образом, чтобы напряжение тока на выходе составляло 240 В, при 15 кВт мощности. Генератор представляет собой своего рода набор свободных от трения подшипников и одновременно систему из трех вращающихся трансформаторов в одном корпусе, на выходе которого получается ток очень высокого напряжения. Внешний вид генератора показан на рисунке 6.22.

Интересная конструкция магнитного двигателя, предложенная Адексеенко В.Г., была запатентована в России. Устройство этого двигателя показано на рисунке 7.22. Здесь: 1– постоянный магнит–статор; 2,3– постоянные магниты–роторы; 4–вращающийся диск; 5– шток; 6–опора вращения. Как видно из рисунка, двигатель состоит из диска (маховика), закрепленного на оси вращения. На нем закреплены два подковообразных, постоянных магнитов ротора, которые вместе с диском (маховиком) могут свободно вращаться вокруг оси. Параллельно рабочему диску (маховику) двигателя на штоке закреплен неподвижно цилиндрический постоянный магнит стопора, который вместе со штоком может перемещаться в зону действия магнитных полей постоянных магнитов ротора, расположенных на рабочем диске. Все магниты обращены друг к другу одноименными полюсами. При введении магнита 1 при помощи штока в зону действия магнитов (2и 3) их магнитные поля полюсов N вступают во взаимодействие. Они складываются, и их результирующий отталкивающий момент усиливается. При этом возникают в горизонтальной плоскости силы отталкивания у магнита 1 (статора), направленные радиально к поверхностям конических торцов полюсов N магнитов 2 и 3 (ротора). А так как диск с магнитами 2 и 3 имеет степень свободы и может свободно вращаться вокруг оси, то под влиянием отталкивающей силы магнита N 1 (статора), действующей на поверхности конических торцов полюсов N магнитов (ротора) диск поворачивается по кругу. Вследствие этого и происходит непрерывное вращение диска, т.е. (ротора) вокруг оси. Двигатель работает от энергии сильных магнитных полей постоянных магнитов за счет разницы потенциалов магнитной энергии на полюсах магнитов ротора и их нейтральных зонах. На рисунке 7.22. изображен второй вариант магнитного двигателя Адексеенко В.Г. На этом рисунке показан магнит 1 (статор), имеющий форму круга закрепленного на опоре 4.

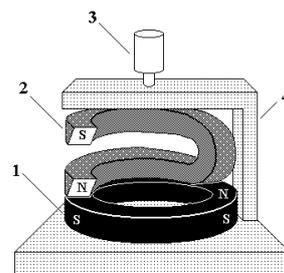


**Рис. 6.22. Устройство двигателя Алексеенко**

Параллельно магниту 1 расположен подковообразный магнит 2 (ротор), который закреплен на диске со штоком. Полюса N и S магнита 2 имеют конусообразную форму под углом 40-45 градусов. Диск с магнитом 2 при помощи штока может подниматься и опускаться к поверхности торца полюса N магнита 1. Магниты 1 и 2 направлены друг к другу одноименными полюсами. При опускании магнита 2 при помощи штока 3 к поверхности торца полюса N магнита 1 на близкое расстояние их магнитные поля полюсов N вступают во взаимодействия. Они складываются, их результирующий отталкивающий момент усиливается. При этом возникают силы отталкивания у торца полюса N магнита 1 (статора)

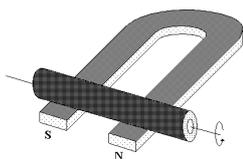
в вертикальном направлении, вдоль. Вследствие этого и происходит непрерывное вращение диска двигателя, т.е. (ротора) вокруг оси по направлению часовой стрелки.

Также следует отметить двигатель, предложенный Состиным О. П., в основе работы которого лежит взаимодействие постоянных магнитов. В этой конструкции, статор выполнен в виде пластины из диамагнитного материала. Постоянные магниты закреплены на ней с двух сторон. В зоне полюсов магнитов статора установлены контакты, подключенные к источнику тока, магнитные элементы ротора выполнены в виде пары тяговых роликов, снабженных индукционными катушками и сдвоенными контактами. Контакты ротора подключены к катушкам роликов и расположены на концах оси с возможностью периодического взаимодействия с контактами статора. Устройство двигателя показано на рисунке 8.22. На этом рисунке: 1— вал; 2— поперечная ось; 3 —тяговые ролики; 4— индуктивные катушки; 5—сдвоенные контакты; 6 – аккумулятор; 7— пусковая кнопка; 8 – коллекторные контакты; 9— магниты; 10 –кольцевой статор. Как видно из приведенного рисунка, **двигатель содержит кольцевой статор**, выполненный в виде пластины из диамагнитного материала с закрепленными на ней с двух сторон постоянными магнитами. Через отверстие статора проходит ротор, состоящий из вала **для отбора мощности**. Также имеется, по крайней мере одна поперечная ось, на концах которой, с возможностью качения по магнитам статора, установлено по два тяговых ролика. На рисунке 8.22. показан ротор с двумя поперечными осями, расположенными перпендикулярно друг другу по разные стороны



**Рис. 7.22.**

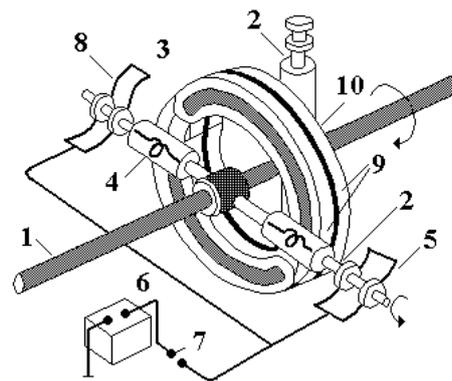
статора, и двумя парами валиков. В зоне полюсов магнитов статора установлены коллекторы-контакты, подключенные к источнику тока. Тяговые валики имеют индукционные катушки, подключенные к сдвоенным контактам. Принцип работы этого двигателя показан на рисунке 9.22. Для запуска двигателя через пусковую кнопку подается электроэнергия на катушки тяговых валиков. При этом валики намагничиваются таким образом, что на их концах образуются полюса, одноименные полюсам магнитов статора. Одноименные полюса отталкиваются, в то же время другая пара валиков, находясь под воздействием противоположного полюса магнита потока, притягивается к полюсам магнитов статора. В результате валики катятся по магнитам, а вал начинает вращаться. При вращении вала, связанные с ним контакты периодически взаимодействуют со стационарными контактами. При этом, кратковременного взаимодействия контактов оказывается достаточно для изменения знаков магнитных полюсов, так как в то время, когда контакты разомкнуты, ротор продолжает вращаться по инерции и без остановки. Крутящий момент вала посредством промежуточных узлов используется для привода различных машин и механизмов: электрогенераторов, транспортных средств, станков и т.д. Недостатками этого двигателя, по мнению некоторых экспертов, являются: сложная конструкция и большие габариты.



**Рис. 9.22. Принцип работы двигателя**  
Состина

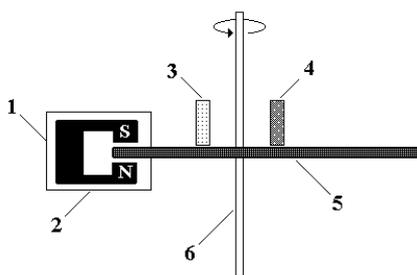
Вполне ясно, что известные и предлагаемые конструкции магнитных двигателей – генераторов и их энергетика, не смотря на наличие патентов, пока еще несовершенны. Более того в литературе практически отсутствуют данные о КПД описанных конструкций.

Однако, следует отметить, что при оценке перспективности устройств на постоянных магнитах, недопустимо считать, что магнитная энергия является “дармовой” – ее себестоимость требует такого же учета затрат, как и для любых других энергоустановок на возобновляемых источниках энергии. Эффективность описанных выше двигателей зависит от типа используемых магнитов. Новейшим добавлением к ранее известным ферритовым (керамическим) и алюминий-никель-кобальтовым (типа “Алнико”) магнитным материалам являются спеченные из редкоземельных элементов – самарий-кобальтовые (SmCo) и неодимовые (NdFeB) магниты. В них достигается уровень магнитной энергии до 45-50 (в мега гаусс эрстедах).



**Рис. 8.22. Устройство двигателя**  
Состина

Говоря об использовании постоянных магнитов и об энергии магнитного поля, следует отметить технологию магнитного охлаждения. Работы, посвященные магнитному охлаждению, ведутся во многих лабораториях и университетах Европы, США, Канады, Китая и России. Технология магнитного охлаждения основана на способности любого магнитного материала изменять свою температуру под воздействием магнитного поля, как это происходит при сжатии или расширении газа или пара в традиционных холодильниках. Такое изменение температуры (или энтропии) магнитного материала при изменении напряженности магнитного поля, в котором он находится, называется магнитокалорическим эффектом. Изменение температуры магнитного материала происходит в результате перераспределения внутренней энергии магнитного вещества между системой магнитных моментов его атомов и кристаллической решеткой. Максимальной величины магнитокалорический эффект наблюдается в магнитоупорядоченных материалах, таких как ферромагнетики, антиферромагнетики и т.п., при температурах магнитных фазовых переходов – температурах магнитного упорядочения. Главное преимущество устройств для магнитного охлаждения связано с высокой плотностью материала – твердого тела – по сравнению с плотностью пара или газа. Изменение энтропии на единицу объема в твердых магнитных материалах в 7 раз выше, чем в газе. Это позволяет делать значительно более компактные холодильники, используя в качестве рабочего тела магнитный материал. Само магнитное рабочее тело служит аналогом хладагентов, используемых в традиционных парогазовых холодильных установках, а процесс размагничивания - намагничивания – аналогом циклов сжатия – расширения. Рабочий прототип предлагаемого бытового магнитного холодильника действует в области комнатных температур и использует в качестве источника поля постоянный магнит. В этом прототипе магнитного холодильника используется вращающаяся колёсная конструкция. Она состоит из колеса, содержащего сегменты с порошком



**Рис. 10. 22. Упрощенная конструкция магнитного холодильника**

гадолиния, а также мощного постоянного магнита. На рисунке 3.36 показана сильно упрощенная конструкция магнитного холодильника. На этом рисунке: 1– постоянный магнит; 2 –магнитопровод; 3 – горячий теплообменник; 4–холодный теплообменник; 5 – колесо с магнитным порошком; 6 – ось вращения. Конструкция спроектирована таким образом, что колесо прокручивается через рабочий зазор магнита, в котором создана наибольшая концентрация магнитного поля. При вхождении сегмента

с гадолинием в магнитное поле в гадолинии возникает магнитокалорический эффект – он нагревается. Это тепло отводится

теплообменником, охлаждаемым водой. Когда гадолиний выходит из зоны магнитного поля, возникает магнетокалорический эффект противоположного знака и материал дополнительно охлаждается, охлаждая теплообменник с циркулирующим в нем вторым потоком воды. Этот поток собственно и используется для охлаждения холодильной камеры магнитного холодильника. Такое устройство является компактным и работает фактически бесшумно и без вибраций, что выгодно отличает его от использующихся сегодня холодильников с парогазовым циклом.

### **Контрольные вопросы**

Какие существуют конструкции использующие энергию постоянных магнитов?

На каких физических эффектах основана работа двигателей на постоянных магнитах?

В чем заключаются достоинства и недостатки двигателей использующих энергию постоянных магнитов?

На каком физическом эффекте основана технология магнитного охлаждения?

В каких странах мира ведутся работы по использованию технологии магнитного охлаждения?

## Лекция 23. Солнечные аэро – электростанции.

В настоящее время существует несколько способов и конструкций, с помощью которых энергия солнечного излучения и ветра преобразуется в электрическую энергию. В качестве примера можно привести «Солнечную башню», установленную городе Манцанарес в Испании. Эта конструкция была первой, использующей способ преобразования аэро - гелиоэнергии в электрическую энергию. Принцип работы этой «Солнечной башни» заключается в следующем: большая площадь земной поверхности накрывается прозрачным для солнечных лучей покрытием, под которым воздух нагревается и движется по высокой вытяжной трубе. Т.е. используется механизм нагрева атмосферного воздуха энергией Солнца и подъем нагретого воздуха в вертикальной трубе. На пути движения воздуха устанавливается электрический генератор с лопостями. Поднимающийся воздух вращает лопасти и генератор вырабатывает электрическую энергию. На рисунке 1.23 показанно устройство «солнечной башни».

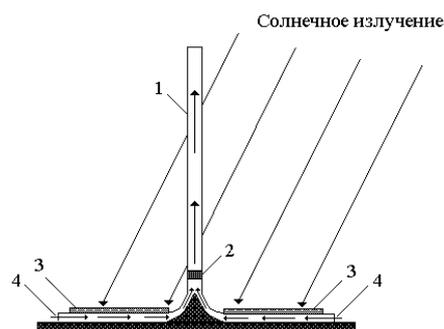


Рис. 1.23. Устройство «Солнечной башни»

На этом рисунке: 1– бетонная башня; 2– турбогенератор; 3– прозрачное покрытие; 4 – воздухозаборник. Высота трубы 194 м, диаметр стеклянного покрытия около 240 м, а рабочая площадь составляет 45000 м<sup>2</sup>. Мощность электростанции около 50 кВт, а КПД конструкции составляет 0,1-0,14 % при солнечной постоянной равной 820 Вт/м<sup>2</sup>.

Основные недостатки данного варианта технологии «солнечной башни» следующие: низкий КПД преобразования солнечной энергии, большие размеры вытяжной трубы, сложность эксплуатации громоздкого инженерного сооружения.

Для устранения вышеперечисленных недостатков и повышения эффективности солнечных воздушных электростанций было предложено много различных способов дополнительной экстракции энергии низкопотенциальной окружающей среды. Одним из таких способов является использование не только энергии поднимающегося воздуха, но и силы микровихревых потоков, создаваемых внутри установки. Сибирские разработчики предложили способ, как из обычного потока нагретого воздуха создать небольшой управляемый торнадо. С помощью особой конструкции воздуховодов им удалось добиться того, что горячий воздух, который вращает турбину, не просто поднимается вверх, а еще и вращается по окружности со скоростью, в пять раз превышающей скорость

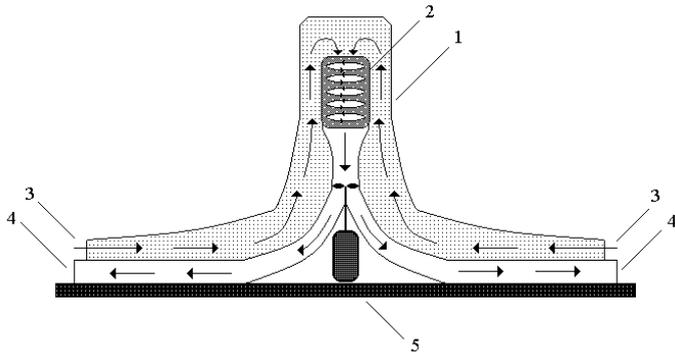


Рис. 2 23. Устройство вихревой аэрогелиостанции

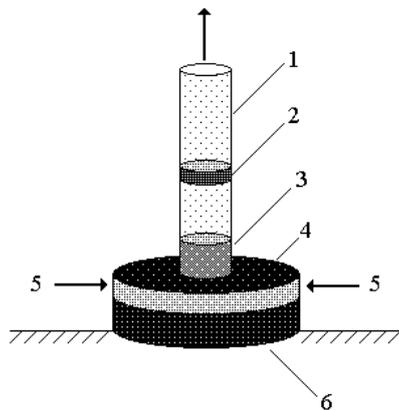
дополнительный импульс основной струе. Воздух, нагретый солнцем, поднимается вверх в центральной части электростанции. Затем воздух захватывается вихрем и направляется вниз (а не вверх как в обычных солнечных аэро электростанциях). От прокачиваемого через вихрь атмосферного воздуха отбирается дополнительная энергия. По словам разработчиков, им удалось сконструировать гелиоаэробарическую станцию, КПД которой уже сейчас достигает 20-28 процентов. Площадь проектируемой сейчас конструкции составляет примерно 2500 квадратных метров. Ее высота – 24 метра. На рисунке 2.23. показано упрощенное устройство станции этого типа. На этом рисунке: 1 – башня станции; 2 – вихреобразующее устройство; 3 – поток нагретого воздуха; 4 – поток холодного воздуха.

На первый взгляд, принцип действия этой станции прост – есть специальные концентраторы солнечной энергии, или, попросту, парники, сделанные из специальных материалов, находясь в которых, воздух нагревается солнечными лучами. Затем нагретый воздух поступает в центральную башню, где, согласно законам физики, поднимается вверх и вращает генератор. Причем часть энергии отводится в так называемый тепловой аккумулятор – подземный бункер, заполненный материалом, способным долго сохранять тепло. Когда солнце уйдет за небосвод, он будет поддерживать работу установки, обеспечивая непрерывную выработку электроэнергии. Однако получить хороший КПД от станций подобного типа, пока не удалось. Тем не менее в настоящее время в Бердске строится образец первой в России научно-исследовательской гелиоаэробарической (солнечно-ветровой) теплоэлектростанции. Основным принципом работы строящейся гелиоаэробарической ТЭС является формирование вихревого воздушного потока, вращающего высокоэффективный ветротурбогенератор, установленный в вертикальной тяговой трубе. Этот воздушный поток формируется путем сложения потоков естественного ветра и конвекционных потоков от нагреваемых с помощью собранной и концентрированной солнечной энергии вихреобразующих аэродинамических устройств. Для нагревания атмосферного воздуха служат специальные устройства – адсорберы. В них, за счет солнечного излучения,

вертикального подъема. При этом в качестве дополнительной силы, которая закручивает воздушный поток, используется энергия ветра. Через особые отверстия в центральной башне, снабженные регулируемыи заслонками, ветряной поток будет поступать в главный канал, передавая

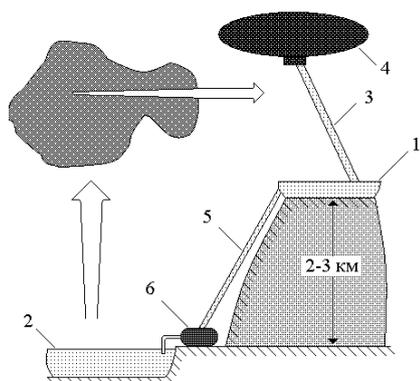
происходит нагрев воздуха. Для работы станции в ночное время и поддержания стабильного режима работы в зимний период в проекте предусмотрен теплоаккумулятор.

В литературе так же описана, запатентованная в России, солнечная магнитогидродинамическая воздушная электростанция. Эта станция, так же как и ранее описанные станции, содержит трубу и теплоаккумулятор солнечной энергии. Однако, для увеличения КПД, внутри трубы последовательно установлены ионизатор и магнитогидродинамический генератор. Эта станция осуществляет преобразование и аккумуляцию солнечной энергии с получением тепловой энергии, посредством которой создается вращательное движение воздуха в солнечном коллекторе. Для более эффективного вращения воздуха создаются воздушные каналы, расположенные параллельно относительно друг друга и соединенные последовательно относительно движения энергонасыщающегося воздушного потока. В каждом из таких каналов устанавливается группа локальных наклонных поверхностей, на которые поступает солнечная радиация через светопроницаемый теплоизолирующий материал и к которым одновременно подводятся управляемые тепловые потоки технологического рабочего тела. В результате этого в солнечном коллекторе и образованных в нем воздушных каналах создаются температурные неоднородности, которые приводят к устойчивым вращающимся воздушным потокам, как вдоль воздушных каналов, так и в их поперечных сечениях и в приповерхностных зонах, с образованием турбулентных, вихревых движений. Воздушный поток поступает на сетчатый ионизатор. Далее, ионизированный воздушный поток, поступает на МГД-генератор. Схема магнитогидродинамической солнечной электростанции приведена на рисунке 3.23. На этом рисунке: 1 – труба; 2 – магнитогидродинамический генератор; 3 – ионизатор; 4 –; 5 –; 6 –;



**Рис. 3.23. Схема магнитогидродинамической солнечной станции**

Далее, ионизированный воздушный поток, поступает на МГД-генератор. Схема магнитогидродинамической солнечной электростанции приведена на рисунке 3.23. На этом рисунке: 1 – труба; 2 – магнитогидродинамический генератор; 3 – ионизатор; 4 –; 5 –; 6 –;



**Рис. 4. 23. Схема аэрогидроэлектростанции, использующей конденсацию влаги из атмосферного воздуха**

Устройство работает следующим образом: преобразованная и аккумулярованная солнечная энергия создает восходящее движение воздуха. Воздушный поток поступает на ионизатор, где происходит его ионизация. Ионизированный воздушный поток, двигаясь по трубе, проходит через систему магнитов, МГД-

генератора. Магнитное поле «сортирует» отрицательно и положительно заряженные ионы газа, направляя их по разным траекториям. Эти потоки заряженных частиц вызывают появление электрических зарядов на соответствующих электродах, между которыми появляется электрический ток, поступающий потребителям.

В литературе так-же описан проект аэро гидроэлектростанции, использующей конденсацию влаги из атмосферного воздуха. Схема одного из вариантов такого проекта показана на рисунке 4.23. В соответствии с предлагаемым проектируемая аэро гидроэлектростанция содержит два накопительных резервуара: 1– верхний и 2– нижний; 3– водовод, 4– дирижабль; 5– дренажная система; 6– турбоэлектро-генератор. По мнению разработчиков, станция будет работать следующим образом. Дирижабль поднимает водовод, изготовленный в виде пленочных поверхностей, на высоту точки росы, для данных атмосферных условий (обычно это 2-3 км). Там переохлажденная атмосферная влага начинает активно конденсироваться на поверхностях. Водовод отводит эту воду в небольшой верхний резервуар, откуда вода под напором всего перепада высот (2-3 км) поступает по напорному или безнапорному водоводу в нижний резервуар на земле, производя электроэнергию в турбоэлектрогенераторе. Поверхности водовода могут быть выполнены с полной или частичной металлизацией (например, вплетением металлических проводников). Это позволит увеличить прочность конструкции, снизить солнечный нагрев, усилить конденсацию водяного пара за счет подачи электрического поля (например, имеются эксперименты по использованию для этого коронного разряда), а также при необходимости уменьшить обледенение за счет подачи тока.

Принципиальным отличием этой станции является конденсация влаги из атмосферного воздуха, что на первый взгляд кажется практически неосуществимым. Тем не менее, на этом принципе успешно работают несколько установок, называемых сборщиками тумана. Например, установка для сбора питьевой воды в Чили была испытана еще в 1987 г.

В настоящее время начато строительство аэро воздушной электрической станции мощностью 200 МВт в Австралии. Китай начал работы по строительству «солнечной башни» в пустынных областях. Перед разработчиками ставится задача: увеличить КПД преобразования солнечной энергии в электрическую энергию и уменьшить габаритные размеры вытяжной трубы. Однако принцип работы остается прежним. Проектируемые установки содержат участок земной поверхности, с прозрачным покрытием, аккумулирующим солнечную энергию, которая нагревает воздух, поступающий в вытяжную трубу, оборудованную турбогенераторным узлом. Для повышения эффективности, ветровой воздушный поток направляют под прозрачное покрытие по касательной к внешнему краю окружности прозрачного покрытия, который соединяется с внутренним движущимся воздухом и отдает свою энергию движения

турбогенераторному узлу. В качестве теплового рабочего тела предлагается использовать не только воздух, но и водяной пар, энергия конденсации которого преобразуется в механическую и далее в электрическую энергию при температуре наружного воздуха выше 0 °С, а энергия кристаллизации – при температуре наружного воздуха ниже 0°С. Воду распыляют в нижней части вытяжной трубы (при использовании теплоты конденсации), или в верхней части трубы (при использовании теплоты кристаллизации), что так-же интенсифицирует работу установки.

### **Контрольные вопросы**

На каких эффектах основан принцип работы солнечных аэро – электростанций?

Какие используются способы экстракции дополнительной энергии окружающей среды в солнечных аэро – электростанциях?

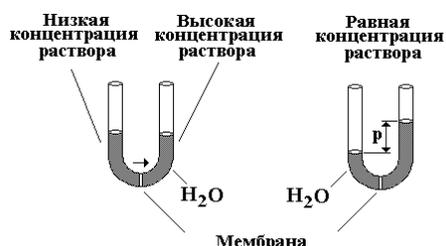
На каких физических эффектах основана работа солнечной магнитогидродинамической воздушной электростанции?

В чем заключаются основные недостатки солнечных аэро – электростанций?

## Лекция 24. Осмотические электростанции.

Осмоз (от греческого слова *Osmos* – толчок, давление), диффузия вещества, обычно растворителя, через полупроницаемую мембрану, разделяющую раствор и чистый растворитель или два раствора различной концентрации. Полупроницаемая мембрана – перегородка, пропускающая малые молекул растворителя, но непроницаемая для более крупных молекул растворенного вещества. Явление осмоса (выравнивание концентраций растворов, разделенных полупроницаемой мембраной) лежит в основе обмена веществ, всех живых организмов. Например, стенки клеток растений, животных и человека представляют собой естественную мембрану, которая является частично проницаемой, поскольку она свободно пропускает молекулы воды, но не молекулы других веществ. Когда корни растений впитывают воду, стенки их клеток формируют натуральную осмотическую мембрану, которая пропускает молекулы воды и отторгает большинство примесей. Травы и цветы стоят вертикально только за счет так называемого осмотического давления. Поэтому при недостатке воды они выглядят пожухлыми и вялыми. Фильтрующая способность природной мембраны уникальна, она отделяет вещества от воды на молекулярном уровне и именно это позволяет любому живому организму существовать.

Применение мембран для отделения одних компонентов раствора от других известно очень давно. В первые, Аристотель обнаружил, что



**Рис. 1.24. Схема иллюстрирующая явление осмоса**

морская вода опресняется, если ее пропустить через стенки воскового сосуда. Изучение этого явления и других мембранных процессов началось гораздо позже, в начале XVIII века, когда Реомюр использовал для научных целей полупроницаемые мембраны природного происхождения. Но до середины 20-х годов прошлого века все эти процессы имели

сугубо теоретический интерес, не выходя за пределы лабораторий. В 1927 году немецкая фирма «Сарториус» получила первые образцы искусственных мембран. И только в середине прошлого века американские разработчики, наладили производство ацетат целлюлозных и нитроцеллюлозных мембран. В конце 50-х – начале 60-х годов с началом широкого производства синтетических полимерных материалов появились первые научные работы, которые легли с основу промышленного применения обратного осмоса. Первые промышленные обратно осмотические системы появились только в начале 70-х годов, поэтому это сравнительно молодая технология по сравнению с тем же ионным обменом или адсорбцией на активированных углях. Тем не менее, в Западных странах обратный осмос стал одним из самых экономичных, универсальных

и надежных методов очистки воды, который позволяет снизить концентрацию находящихся в воде компонентов на 96-99% и практически на 100% избавиться от микроорганизмов и вирусов.

Механизм переноса молекул воды через осмотическую мембраны чаще всего представляет собой обычную фильтрацию, при которой происходит задержание частиц размером больше диаметра пор осмотической мембраны. Выравнивание концентраций по обе стороны такой мембраны возможно только при односторонней диффузии растворителя. Поэтому осмос всегда идет от чистого растворителя к раствору или от разбавленного раствора к концентрированному раствору. В частности, явление осмоса наблюдается, когда два соляных раствора с разными концентрациями разделены полупроницаемой мембраной. Эта мембрана пропускает молекулы и ионы определенного размера, но служит барьером для веществ с молекулами большего размера. Таким образом, молекулы воды способны проникать через мембрану, а молекулы растворенных в воде солей – нет. Если по разные стороны полупроницаемой мембраны находятся соляные растворы воды с разной концентрацией солей, молекулы воды будут перемещаться через мембрану из слабо концентрированного раствора в более концентрированный, вызывая в последнем повышение уровня жидкости. Из-за явления осмоса процесс проникновения воды через мембрану наблюдается даже в том случае, когда оба раствора находятся под одинаковым внешним давлением. Разница в высоте уровней двух растворов разной концентрации пропорциональна силе, под действием которой вода проходит через мембрану. Эта сила называется "осмотическим давлением". На рисунке 1.24. приведена схема иллюстрирующая явление осмоса.

Принцип работы осмотической электростанции основан на образовании осмотического давления. В местах, где река впадает в море, пресная речная вода просто перемешивается с соленой морской водой, и никакого давления, которое могло бы послужить источником энергии, там не наблюдается. Однако, если перед смешиванием морскую воду и пресную разделить фильтром – специальной мембраной, пропускающей воду, но не пропускающей соли, то стремление растворов к термодинамическому равновесию и выравниванию концентраций сможет реализоваться только за счет того, что вода будет проникать в раствор соли, а соль в пресную воду не попадет. Специальная мембрана, пропускающая воду, но не пропускающая молекулы соли, ставится между двумя резервуарами. В один из них заполняется пресной водой, в другой – соленой водой. Поскольку такая система стремится к равновесию, более соленая вода как бы вытягивает пресную воду из резервуара. Если же это происходит в закрытом резервуаре, то со стороны морской воды возникает избыточное гидростатическое давление. При этом, появляется давление, которое создает водный поток. Если теперь установить турбину с генератором, избыточное давление будет вращать

лопасти турбины и вырабатывать электричество. На рисунке 2.24 показана упрощенная схема осмотической станции. На этом рисунке: 1– морская вода; 2– речная вода; 3–фильтры; 4– мембрана; 5– рабочая камера; 6– вывод отработанной речной воды; 7 – турбина с электрическим генератором; 8– вывод.

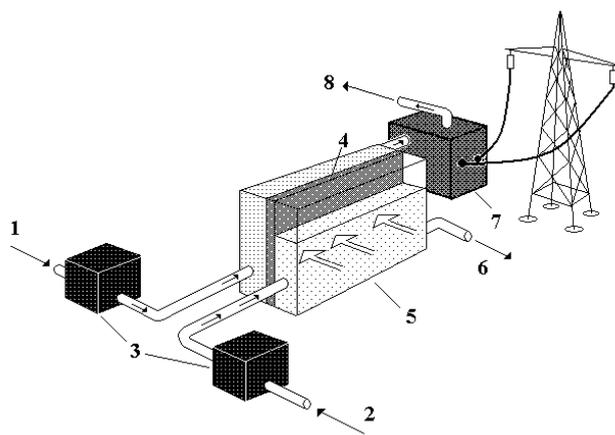


Рис. 2.24. Схема осмотической станции

Теоретические разработки в этой области появились еще в начале XX века, но для их реализации не хватало главного - подходящей осмотической мембраны. Такая мембрана должна была выдерживать давление, в 20 раз превышающее давление обычного бытового водопровода,

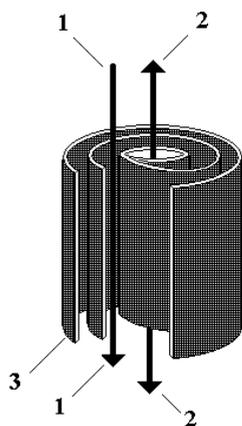


Рис. 3.24. Устройство рулонной мембраны

и иметь чрезвычайно высокую пористость. Создание материалов с подобными свойствами стало возможным с развитием технологий производства синтетических полимеров. Действительно, толщина эффективной мембраны составляет около 0,1 микрометра. Для сравнения: человеческий волос имеет в диаметре от 50 до 100 микрометров. Именно эта тончайшая пленка и отделяет, в конечном счете, морскую воду от пресной воды. Понятно, что столь тонкая мембрана не может сама по себе выдержать высокое осмотическое давление. Поэтому она наносится на пористую, напоминающую губку, но чрезвычайно прочную основу. Кстати, мембрана для прямого осмоса – это не тонкая стенка, которую рисуют на упрощенных схемах, а длинный рулон, заключенный в цилиндрический корпус. Соединения с корпусом сделаны таким образом, что во всех слоях рулона с одной стороны мембраны всегда находится пресная вода, а с другой – стороны морская,

как это показано на рисунке 3.24. На этом рисунке: 1– пресная вода; 2– морская вода; 3– мембрана. На рисунке 4.24. показано устройство мембраны, помещенной в металлический корпус, цилиндрической формы. На этом рисунке: 1– пресная вода; 2–морская вода; 3– мембрана; 4–металлический корпус.

Применяемые в настоящее время композитные мембраны позволяют значительно снизить гидродинамическое сопротивление. В них тонкий селективный слой наносится химическим путем на пористую основу (подложку). Толщина селективного слоя составляет 0,1-1,0 мкм, а толщина пористой основы - 50-150 мкм. Подложка практически не создает

сопротивления потоку благодаря широким порам, а сопротивление селективного слоя значительно снижается благодаря значительному сокращению его толщины. В целом композитная структура мембраны обеспечивает механическую прочность за счет толщины пористой подложки, а кроме того, позволяет снизить общее сопротивление мембраны за счет тонкости селективного слоя. Селективный слой обратн осмотических мембран выполнен из полиамидного материала.

На рисунке 5.24. показано устройство осмотической станции, использующей рулонные мембраны.

На этом рисунке: 1—ввод морской воды; 2—ввод речной воды; 3—фильтры; 4—рулонные мембраны; 5— герметическая камера с высоким осмотическим давлением; 6— турбина с электрогенератором. В 2009 году в Норвегии в городе Тофте начала работу первая в мире электростанция, использующая разность солености морской и пресной воды для получения электроэнергии.

В построенной осмотической электростанции, в отсеке с морской водой создается давление, эквивалентное давлению столба воды высотой 120 метров. Это давление приводит в движение турбину, вал

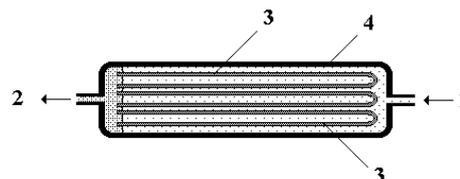


Рис. 4.24. Мембрана в цилиндрическом корпусе

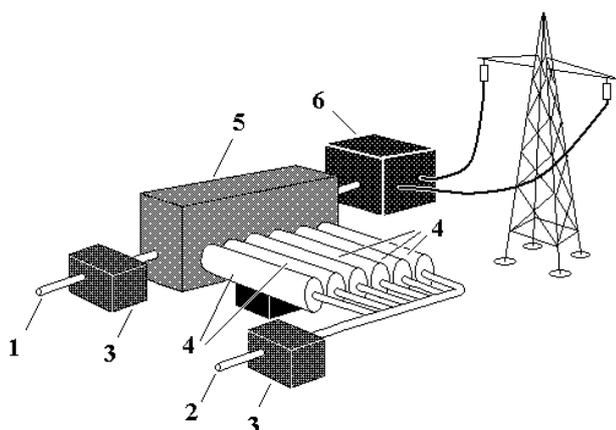


Рис. 5.24. Осмотическая станция с рулонными мембранами

которой приводит в движение электрогенератор. Пресная вода самотеком поступает на мембрану. Забор морской воды осуществляется в Тофте с глубин от 35 до 50 метров – в этом слое ее соленость оптимальна. Кроме того, там она значительно чище, чем у поверхности. Но, несмотря на это, мембраны станции требуют регулярной чистки от забивающих ее микропоры органических остатков. На

сегодняшний день эта осмотическая станция вырабатывает около 1 кВт энергии. В ближайшее время эта цифра может увеличиться до 2–4 кВт. Для того чтобы можно было говорить о рентабельности производства, необходимо получить выработку около 5 кВт. Однако, это вполне реальная задача. К 2015 году планируется построить большую станцию, которая обеспечит выработку 25 МВт, что позволит питать электричеством 10000 средних домохозяйств. В перспективе же предполагается, что осмотические электростанции станут такими мощными, что смогут вырабатывать 1700 ТВт в год, столько, сколько сейчас вырабатывает половина Европы.

Достоинства и преимущества осмотических станций. Во-первых, соленая вода (для работы станции подходит обычная морская вода) является неисчерпаемым природным ресурсом. Поверхность Земли на 94% покрыта водой, 97% которой является соленой, поэтому для таких станций всегда будет топливо. Во-вторых, для строительства осмотических электростанций не требуется строительства специальных гидротехнических сооружений. Экологичность данного способа получения электроэнергии. Никаких отходов, окисляющихся материалов для резервуаров, вредных испарений. Осмотические электростанции могут быть установлены даже в черте города, не нанося никакого ущерба его жителям.

Недавно Япония сообщила, что планирует производить энергию при помощи осмотических станций. Япония окружена со всех океаном, в который впадают многочисленные реки. Так как они текут постоянно, процесс выработки электроэнергии станет непрерывным. Среди плюсов осмотического способа получения энергии независимость от рельефа местности, станция сможет работать и на равнине. Основными являются географические условия, при которых совершается смешение пресной и соленой воды. Таким образом, устанавливать осмотические электростанции можно в любых точках Японии, где реки впадают в океан. Осмотическая станция сможет вырабатывать 5–6 миллионов кВт энергии, для сравнения такой же объем вырабатывают 5–6 атомных электростанций, как утверждает Акихико Таниока, профессор Токийского технического университета. К тому же, Япония является одним из главных производителей осмотических мембран. В настоящее время, на долю японских компаний приходится 70% мирового импорта мембран.

### **Контрольные вопросы**

- На каких эффектах основан принцип работы осмотической электростанции?
- Что называется "осмотическим давлением"?
- В чем заключаются достоинства и преимущества осмотических станций?
- Какие требования предъявляются к мембранам, работающим на осмотических электростанциях?
- Как устроена мембрана для прямого осмоса?
- Какие требования предъявляются к рельефу местности, для строительства осмотической электростанции?
- В каких странах мира имеются осмотические электростанции?

## Лекция 25. Пьезоэлектрические генераторы.

Пьезоэлектрические генераторы – генераторы работающие на основе пьезоэлектрического эффекта. Пьезоэлектрический эффект – возникновение электрических зарядов на поверхности вещества при его механической деформации. Пьезоэлектрический эффект наблюдается в кристаллах, не имеющих центра симметрии, у которых при деформации элементарной структурной ячейки происходит появление электрического момента. Наиболее хорошо пьезоэлектрический эффект проявляется при приложении механической деформации к кристаллам природного кварца. Природные кристаллы кварца принадлежат к гексагональной кристаллографической системе и имеют форму, близкую к шестигранной призме, ограниченной двумя пирамидами. При приложении механической деформации сжатия или растяжения к кристаллу кварца в определенном направлении, на поверхности кристалла образуются электрические заряды. На рисунке 1.25. показан кристалл кварца с указанием его осей симметрии. А на рисунке 2.25. показана кварцевая пластинка, вырезанная из кристалла кварца, перпендикулярно оси *a*. При воздействии давления в направлении оси *a*, приводящем к деформации сжатия или растяжения на гранях 1234 и 5678 появляются электрические заряды разноименных знаков. Поверхностная плотность появившихся зарядов, в пределах упругих воздействий, пропорциональна величине прикладываемых деформаций. Причина возникновения поверхностных зарядов, при приложении механической

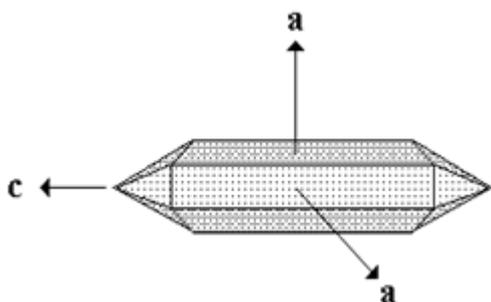


Рис. 1.25. Кристалл кварца с указанием его осей симметрии

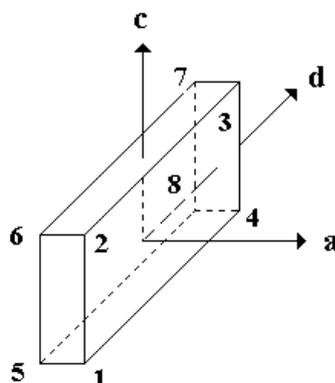
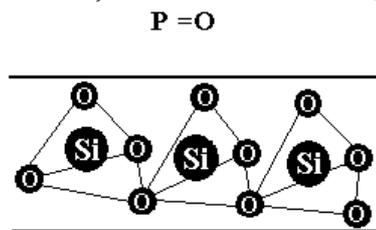


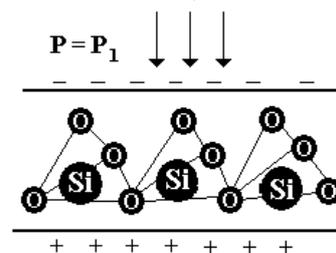
Рис. 2.25. Кварцевая пластинка, вырезанная из кристалла кварца, перпендикулярно оси *a*

деформации к кристаллу кварца, заключается в следующем. По электрической структуре все диэлектрики можно разделить на полярные и неполярные. У полярных диэлектриков структурные единицы вещества имеет собственный дипольный момент. У неполярных диэлектриков в отсутствии внешних воздействий дипольного момента нет. При помещении диэлектрика в электрическое поле диполи в полярных диэлектриках поворачиваются по полю. В неполярных диэлектриках внешнее

механическое воздействие или электрическое поле приводит к смещению зарядов внутри электрически нейтральных молекул, что также приводит к появлению электрических диполей. По механизму смещения заряженных частиц различают электронную, ионную и дипольную поляризацию. По характеру смещения заряженных частиц поляризация может быть упругой и релаксационной. В качестве примера возникновения упругой поляризации, обусловленной смещением зарядов, под воздействием механического напряжения, рассмотрим рисунок 3.25. На этом рисунке показана структура элементарных ячеек кварца, состоящая из трех молекул диоксида кремния -  $\text{SiO}_2$ . При отсутствии механической деформации центры положительных (Si) и отрицательных (O) ионов совпадают (рис 3.25.а). При воздействии механической деформации, приводящей к сжатию кристалла в вертикальном направлении, положительные ионы смещаются на некоторое расстояние в низ, а отрицательные ионы – вверх (рис. 3.25.б). В результате такого смещения центры положительных и отрицательных ионов теперь не совпадают. В результате такого смещения на поверхности кристалла появляются электрические заряды, и возникает разность потенциалов. При деформации, приводящей к сжатию кристалла в горизонтальном направлении, знак возникающей разности потенциалов меняется.



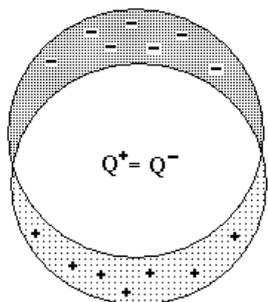
**Рис. 3.25. а.** При отсутствии механической деформации центры положительных (Si) и отрицательных (O) ионов совпадают



**Рис. 3.25.б.** При воздействии механической деформации, положительные и отрицательные ионы смещаются

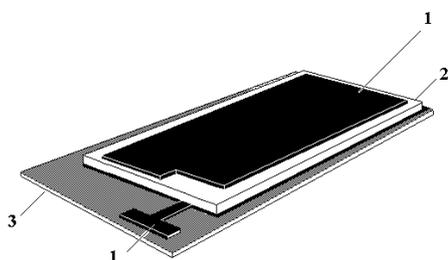
На рисунке 4.25. условно показано смещение центров положительных и отрицательных ионов, при воздействии деформации сжатия в вертикальном направлении. Видно, что компенсация отрицательных и положительных зарядов имеет место только в области их взаимного перекрытия. Вне этой области образуется не скомпенсированные отрицательные (в верхней части рисунка) и положительные (в нижней его части) заряды. В общем случае при механической деформации кристаллов в структуре его решетки происходят изменения двух типов. Во-первых, деформируется каждая элементарная ячейка. Так при одностороннем сжатии кристалла с кубической симметрией его элементарная ячейка превращается из куба в параллелепипед. Во – вторых, при деформации кристалла может происходить сдвиг элементарных ячеек друг относительно друга. Однако этот сдвиг может происходить только в кристаллах, не имеющих центра

симметрии. Поэтому хорошими пьезоэлектрическими свойствами обладают только те кристаллы, которые имеют низкую степень симметрии. Многолетний опыт проектирования различных преобразователей энергии показывает, что в настоящее время многие электромагнитные механизмы могут быть заменены твердотельными, пьезокерамическими преобразователями.

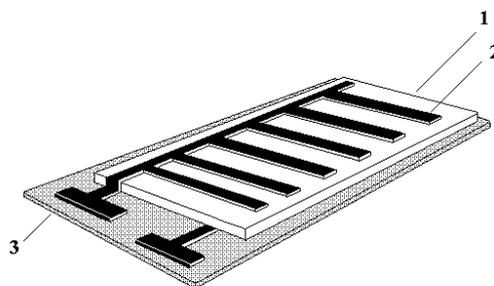


**Рис. 4.25. Смещение центров положительных и отрицательных ионов**

На сегодняшний день различными странами разработано много разнообразных конструкций пьезоэлектрических генераторов, содержащих отдельные или объединенные в группы, электрически и механически связанные друг с другом пьезоэлементы (стержни, пластинки, диски), на поверхности которых нанесены электроды. Наиболее простые конструкции пьезоэлектрических генераторов, показаны на рисунках 5.25. и 6.25. На этих рисунках: 1—металлические, токосъемные контакты; 2— кварцевая пластинка; 3— диэлектрическая подложка. Такие пьезоэлектрические генераторы способны вырабатывать электрический ток при механическом воздействии на его пьезоэлементы. Недостатками генераторов этого типа являются: малая удельная электропроизводительность на единицу объема и высокая хрупкость конструкции.



**Рис. 5.25. Устройство простейшего пьезоэлектрического генератора, со сплошными металлическими контактами**

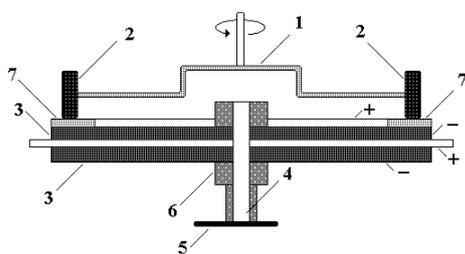


**Рис. 6.25. Устройство простейшего пьезоэлектрического генератора, с гребенчатыми металлическими контактами**

В литературе описан пьезоэлектрический генератор – основой которого является слоистая структура, состоящая из скрепленных между собой магнетострикционного и пьезоэлектрического слоев. Эта структура снабжена тонкопленочным выпрямителем, выполненного из р и n полупроводниковых слоев, и конденсатора, состоящего из двух металлических и одного диэлектрического слоев, выполненных непосредственно на структуре в одном технологическом цикле. За счет использования асимметричной структуры, состоящей из слоя пьезоэлектрического и магнетострикционного материала, возможна эффективная работа устройства на частоте изгибной моды

электромеханического резонанса в области инфразвука. Это устройство позволяет получать на выходе постоянное стабильное напряжение.

Пьезокерамический генератор постоянного тока. Этот генератор имеет цилиндрический, биморфный дисковый тонкостенный пьезоэлемент, два деформирующих ролика и два токосъемника. Устойство генератора



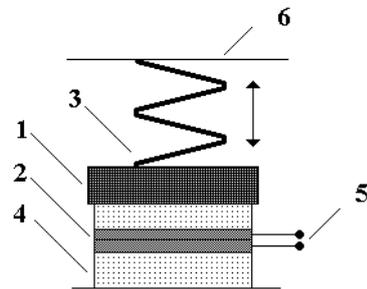
**Рис. 7.25. Пьезокерамический генератор постоянного тока**

показано на рисунке 7.25. На этом рисунке показаны: 1–ротор; 2– деформирующие ролики; 3–дискообразные пьезоэлементы; 4–полый штырь; 5–статор; 6–изолирующие шайбы; 7– гибкая изолирующая прокладка. Знаками "+" и "-" на рисунке показано направление поляризации пластин пьезоэлемента. Генератор работает следующим образом. При вращении ротора от внешнего источника механической энергии ролики, которые установлены относительно дисковых пьезоэлементов таким образом, что обеспечивается их деформация, прокатываются по прокладке. При деформации пьезоэлемента на электродах вследствие прямого пьезоэффекта возникают заряды, при этом на внешних электродах пьезоэлемента – заряды противоположного знака, которые составляют разности потенциалов. При вращении ротора и круговой деформации пьезоэлемента на электродах возникает постоянная разность потенциалов, соответствующая величине деформации. Для повышения надежности и уменьшения износа деформация пьезоэлемента нажимными роликами производится через гибкую прокладку, закрепленную по краю биморфного диска. Электроды, разных пьезоэлементов, можно соединять в электрическую цепь последовательно и параллельно, получая различные уровни генерируемого напряжения. Благодаря закреплению пьезоэлементов с возможностью поворота – в значительной степени компенсируется синфазная составляющая генерируемого напряжения.

Практически осуществимо изготовление дисковых пьезоэлементов для генератора большой мощности. Авторами, например, были проведены работы по созданию много элементного пьезогенератора для ветроэнергетической силовой установки.

Компания Innowattech предложила систему получения электроэнергии, которая обычно растрачивается напрасно. Источником такой энергии является давление, которое оказывает на поверхность не только движущийся автомобиль, но поезд или самолет во время взлета или посадки. Преимущества этой системы, по сравнению с другими разработками в области добычи экологически чистой энергии в том, что не требуется выделения дополнительной территории, не наносится ущерб окружающей среде, система работает независимо от погодных условий. Под асфальт на автотрассу или под рельсы на железной дороге на определенном

расстоянии друг от друга устанавливаются пьезоэлектрические генераторы, способные превращать энергию давления проезжающего транспорта в электроэнергию. Запасаемая в накопителях, она будет напрямую поставляться близлежащим потребителям. На рисунке 8.25. показана схема такого преобразователя. На этом рисунке: 1– прикрепленная масса; 2– пьезоэлемент; 3– упругий элемент; 4– основание; 5– токосъемные контакты; 6 – покрытие, воспринимающее переменное давление. Схема устройства, использующего продольный пьезоэффект. Такой принцип получения электрической энергии известен давно.



**Рис. 8.25. Схема преобразователя давления**

Например, что в японском метрополитене есть станция (Marunouchi) с пьезоэлектрическим полом, использующим давление ног пассажиров для выработки электроэнергии, достаточной для питания нескольких турникетов. На таком же принципе действует танцпол в одной из английских дискотек. Танцующие генерируют ток для нескольких дискотечных фонарей, наблюдая процесс генерации, так сказать, собственными глазами. В Окленде также использовали давление проезжающих машин на трассу для выработки электричества. Но принцип работы в этой системе – механический. Там, автомобили давят на установленные под асфальтом плиты, которые, в свою очередь, оказывают давление на подземную систему водоснабжения, в результате чего вода поступает на турбины. Другое известное применение достаточно мощных пьезоэлектрических генераторов, было найдено для питания велосипедной фары. Оказалось, что мощности таких генераторов, установленных на педалях велосипеда, хватило для периодического питания электрической фары на небольшое время.

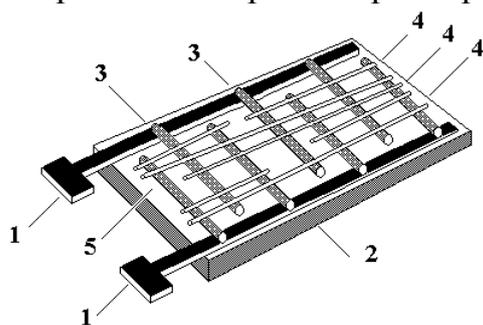
Однако, израильские разработчики, первые, кто смог производить пьезоэлектричество в значительных масштабах. Например, в настоящее время на опытном участке близ станции Лод, компания Innowattech устанавливает рельсы с вмонтированными в них пьезогенераторами. По утверждению разработчиков, прохождение по этому участку в час 10–20 поездов с десятью вагонами каждый позволит полностью обеспечить электричеством 150 жилых домов.

Уже созданы пьезогенераторы для автомобильных и железных дорог, пешеходных тропинок и даже для авиационных рулежных полос.

Интересно еще одно предложение израильских разработчиков по совместному использованию гравитационного взаимодействия и пьезоэлектрического эффекта. Рассмотрим это предложение. Предположим, что у нас есть цилиндр, который может перемещаться вверх-вниз. Если мы подложим под одно из оснований цилиндра пьезоэлемент,

то цилиндр будет воздействовать на этот пьезоэлемент своим весом. Давление, с которым цилиндр будет давить на пьезоэлемент, будет равно отношению веса цилиндра к площади соприкосновения. Мощность, которую будет генерировать пьезоэлемент, зависит от площади самого пьезоэлемента и от величины давления, с которым на него будет воздействовать цилиндр. Теперь вспомним закон Паскаля, который гласит, что давление в жидкости или в газе равномерно распределяется по всем возможным направлениям. Следовательно, если всю внутреннюю поверхность емкости, заполненной какой-либо жидкостью, покрыть пьезоэлементами, а затем создать в ней колебательный процесс, например, слегка изменяя объем емкости, то давление внутри жидкости начнет изменяться в соответствии с изменением ее объема и упругими свойствами самой жидкости и стенок емкости. При этом, пьезоэлементы будут генерировать ЭДС, которая пропорциональна амплитуде изменения давления. В качестве основы для такого преобразователя предлагается использовать герметическую плоскую емкость, заполненную водой или маслом. Верхнее основание этой емкости будет воспринимать на себя давление транспортного средства, и сжимать жидкость. Пьезоэлементы размещаются на внутренних поверхностях емкости. Чем больше площадь внутренних стенок, тем больше пьезоэлементов там можно разместить и, следовательно, получить больше электроэнергии. Такой способ получения электроэнергии становится возможным благодаря созданию плоских и небольших по размеру «наногенераторов».

В лаборатории Технологического Института Джорджии разработано два типа наногенераторов, инкапсулированных в полимерную пленку. Каждый из генераторов представляет собой тонкий листок пластика, размеры которого соизмеримы с размерами листа бумаги для записей.



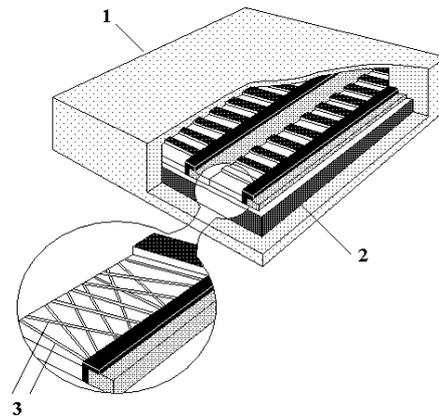
**Рис. 9.25. Устройство пьезогенератора на основе нанопроводов из оксида цинка**

На рисунке 9.25. показано устройство одного из наногенераторов. На этом рисунке: 1– выходные электроды; 2– кремниевая подложка; 3– платиновые электроды; 4– нанопровода из оксида цинка; 5– полимерный наполнитель.

Принцип работы этих наногенераторов основан на пьезоэлектрическом эффекте в нанопроводах из пьезоэлектрического оксида цинка. При этом толщина нанопроводов лежит в пределах нескольких сотен нанометров.

Нанопроводники этого генератора были изготовлены чисто химическим способом. Для увеличения срока работы наногенератора, пространство между нанопроводами заполнено пластиком. Небольшое допустимое сжатие наногенератора приводит к тому, что он генерирует напряжение около 0,24 В.

Другой, более мощный генератор создан по похожему принципу, но содержит значительно большее количество нанопроводов. Устройство этого пьезогенератора показано на рисунке 10.25. На этом рисунке: 1 – полимерный корпус; 2 – металлизированная подложка; 3 – ZnO- нанопроволочки. Выходное напряжение такого генератора прямо пропорционально величине механической деформации, которой подвергаются нанопровода. Исследования показали, что изготовленные опытные образцы могут обеспечить пиковое напряжение 1.26 Вольта, при плотности получаемой электрической мощности – 2.7 милливатта на один кубический сантиметр объема, в том случае, когда материал генератора подвержен деформации всего в 0.19 процента. Такая энергетическая емкость пьезоэлектрического нано-устройства,

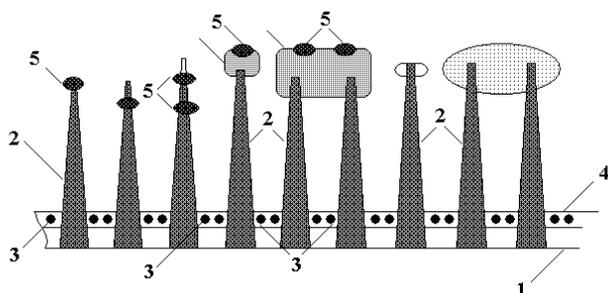


**Рис. 10.25. Пьезогенератор на основе большого массива нанопроводов.**

указывает на реальную возможность его практического применения. Помимо высокого значения напряжения, новые наногенераторы обладают рядом преимуществ перед существующими устройствами подобного типа. В них, в отличие от многих известных пьезоэлектрических генераторов, не применяются токсичные металлы, производство таких пьезогенераторов не требует значительных энергетических затрат. Более того, благодаря отсутствию движущихся механических частей эти генераторы могут служить в течение длительного времени без потерь своих характеристик.

Интересна конструкция пьезоэлектрического генератора, который содержит диэлектрическую подложку и наноразмерные столбики из пьезоэлектрика-полупроводника. В этом устройстве наноразмерные столбики жестко вмонтированы в диэлектрическую подложку, а наноразмерные токосъемные проволочные электроды проложены на подложке с обеих сторон столбиков, причем между каждыми двумя электродами, проложенными между соседними рядами столбиков, имеется зазор, а сами электроды заключены в слой упругопластичного изолятора, высота которого соответствует диаметру электродов. Вертикальные наноразмерные столбики, выполнены из оксида цинка. Диэлектрическая подложка выполнена из жесткого диэлектрического полимеризующегося пластика. В пьезоэлектрический генератор введены постоянные наноразмерные магнитные элементы, жестко связанные с вершинами наноразмерных столбиков или заселенные в вершины наноразмерных столбиков или погруженные в каплевидные наноразмерные элементы, или в каждый постоянный наноразмерный магнитный элемент. Устройство пьезогенератора показано на рисунке 11.25. На этом рисунке: 1 – диэлектрическая подложка; 2 – вертикальные наностолбики; 3 – наноразмерные токосъемные электроды; 4 – упругий изолятор; 5 –

наноразмерные постоянные магниты; 6– каплеобразные наноразмерные элементы. Раздельное заключение оснований вертикальных наноразмерных столбиков в подложку необходимо для устранения паразитных электрических связей между ними в процессе работы пьезоэлектрического генератора и, как следствие, повышения выработки электрического тока.



**Рис. 11.25. Устройство пьезогенератора с вертикальными наностолбиками**

Наноразмерные токосъемные проволочные электроды (выполненные, из золота) проложены на подложке с обеих сторон вертикальных наноразмерных столбиков, причем между каждыми двумя наноразмерными токосъемными проволочными электродами имеется зазор, а сами электроды заключены в слой упругого пластичного изолятора, высота которого соответствует диаметру электродов. Постоянные наноразмерные магнитные элементы жестко связаны с вершинами наноразмерных столбиков причем магнитные оси всех постоянных наноразмерных магнитных элементов перпендикулярны наноразмерными токосъемным проволочным электродам, параллельны друг другу и поверхности подложки, а полюса всех постоянных наноразмерных магнитных элементов одинаково ориентированы. Это необходимо для достижения максимальной амплитуды и синхронности качания всех наноразмерных столбиков, что приводит к выработке максимального тока.

В результате совместной работы ученых из Калифорнийского университета в Беркли (США), Мюнхенского технического университета (Германия) и Института электроники Академии наук Китая был сконструирован генератор на базе органических нановолокон. В основе работы этого генератора так же лежит прямой пьезоэффект – возникновение электрической поляризации под действием механических напряжений и деформаций (растяжения, скручивания). Для получения нановолокон органического полимера – поливинилиденфторида – использовалась технология, так называемого электропрядения, которая позволяет с высокой точностью контролировать расположение волокон на подложке. Минимальный диаметр созданных наногенераторов – составил 500 нм. При механическом воздействии они генерировали выходное напряжение в диапазоне 5–30 мВ и выходной ток от 0,5 до 3,0 нА. Зарегистрированная в эксперименте эффективность преобразования энергии доходила до 21,8% при среднем значении в 12,5%.

Интересна разработка пьезоэлектрического генератора на резиновой основе. В основе этой разработки лежит использование наночастиц одного из самых эффективных пьезоэлектриков: цирконата-титаната свинца. Эти частицы наносятся на тонкую ленту из кремнийорганической резины. В

результате, можно создавать генераторы, преобразующие кинетическую энергию в электрическую. При этом разработчики обещают получить КПД, достигающий отметки в 80%.

Следует отметить, что пьезоэлектрический эффект, первоначально обнаруженный в природных материалах, таких как кварц, турмалин, Сегнетова соль и т. д., довольно слабый. В настоящее время синтезированы поликристаллические сегнетоэлектрические керамические материалы с улучшенными свойствами, такие как титанат бария  $\text{BaTiO}_3$  и цирконат-титанат свинца PZT (аббревиатура формулы  $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$  ( $0 < x < 1$ )).

В PZT-кристалле отрицательные и положительные электрические заряды разделены, но при этом они распределены в объеме кристалла симметрично, что делает его электрически нейтральным. Чтобы подобная керамика стала пьезоэлектриком, необходимо «отрегулировать» полярность зарядов в кристаллической решетке. Для этого нагреваемую керамику подвергают обработке сильным электрическим полем ( $E > 2000$  В/мм), которое приводит к нарушению симметрии в кристалле. В пьезокристаллах заряды разных знаков формируют электрический диполь. Несколько близлежащих диполей формируют так называемые домены Вейса. До установления полярности домены ориентированы произвольным образом. Под действием электрического поля и высокой температуры кристалл расширяется в направлении поля и сжимается по перпендикулярной оси. Это приводит к выстраиванию диполей вдоль приложенного электрического поля. После выключения поля и остывания пьезокерамика приобретает остаточную поляризацию. Если к кристаллу с отрегулированной полярностью приложить электрическое поле, домены Вейса начинают выравниваться вдоль поля, причем степень выравнивания зависит от приложенного электрического напряжения. В результате возникает изменение размеров пьезоэлектрического материала. При механическом давлении симметрия распределения зарядов нарушается, приводя к разности потенциалов на поверхностях кристалла. Например, кварц объемом  $1 \text{ см}^3$  при приложении силы  $2 \text{ кН}$  может произвести напряжение до  $12500 \text{ В}$ .

Теперь вернемся к работе американских ученых. Используя динамическую модель, исследователи показали, что в узком диапазоне геометрических размеров пьезоэлектрические наноструктуры могут преобразовывать энергию с очень большой эффективностью. При этом, они учитывали не только пьезоэлектрический, но и флексоэлектрический эффект (появление электрического напряжения при сгибе сконструирован генератор на базе органических нановолокон нии и кручении пьезоэлектрика), который вносит дополнительный вклад в результирующую эффективность пьезоэлектрических устройств. В настоящее время установлено, что наиболее сильно флексоэлектрический эффект проявляет себя на наноуровне. В этом случае он в три раза превышает по эффективности обычный пьезоэлектрический эффект. Это относится, прежде всего, к PZT-материалам, выполненным в виде нанокантилеверов

(балок нанометровых размеров с одной точкой опоры) толщиной в пределах 20–23 нм. При таких условиях нанокантилевер достаточно гибкий и чувствителен к внешнему воздействию. Любая незначительная вибрация, передающаяся через точку опоры, приводят кантилевер в движение, в результате чего в нём возникают как пьезоэлектричество, так и флексоэлектричество. Расчеты показали, что флексоэлектрический эффект в несколько раз увеличивает эффективность сбора энергии нанокантилевером.

### **Контрольные вопросы**

На каком физическом эффекте основан принцип работы пьезоэлектрических генераторов?

В чем заключается пьезоэлектрический эффект?

В каких кристаллах наблюдается пьезоэлектрический эффект?

Какие устройства называются пьезоэлектрическими наногенераторами?

Каков принцип работы генератора на базе органических нановолокон?

В чем заключается флексоэлектрический эффект?

Что называется нанокантилевером?

### **Заключение**

В настоящем курсе лекций рассмотрены наиболее широко используемые, в настоящее время, и развивающиеся источники энергии. К таким, широко используемым, источникам энергии относятся: тепловые электростанции, гидроэлектростанции и атомные электростанции.

В качестве топлива на тепловых электростанциях обычно используются уголь, мазут, газ, сланцы. Эти виды топлива относятся к невозобновимым ресурсам. Согласно усредненным оценкам угля на планете хватит на 100-300 лет, нефти на 40-80 лет, природного газа на 50-120 лет.

К основным достоинствам гидроэлектростанций относятся: низкая себестоимость вырабатываемой электроэнергии, быстрая окупаемость, возможность аккумуляции энергии. Но даже при полном использовании потенциала всех рек Земли можно обеспечить не более четверти современных потребностей человечества, более того сооружение гидроэлектростанций (особенно на равнинных реках) приводит ко многим экологическим проблемам.

Атомные электростанции – являются намного экономичнее обычных тепловых электростанций, количество радиоактивных веществ, образующихся в период эксплуатации электростанции, сравнительно невелико а, самое главное – это чистые источники энергии. Однако процесс безопасной эксплуатации атомных электростанций еще не решен.

К наиболее интенсивно развивающимся, в настоящее время, источникам энергии относятся волновые электростанции и электростанции, использующие энергию морских течений, гео и гидротермальную энергию, и осмотические электростанции. Наиболее существенных успехов достигла солнечная энергетика. Большими темпами развивается водородная энергетика

Из приведенного в конспекте материала хорошо видно, что энергетика очень быстро развивается, вбирая новейшие идеи и достижения науки. К таким достижениям можно отнести гипотезу о возможности использования энергии вращения и создания, в будущем, квантовых теплоэлектростанций. Действительно, теория движения показывает, что при раскручивании тел за счет релятивистских эффектов может выделяться не более двух джоулей энергии излучений на каждый вложенный во вращение тела джоуль механической энергии. При этом в таких установках коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую существенно возрастает. На основании этого появляются описания конструкции квантовой теплоэлектростанции, которая в качестве топлива использует воду и энергию вращения, вырабатывающие одновременно и электроэнергию, и горячую воду для теплоснабжения городов. Здесь процессы превращения внутренней энергии вещества в энергию излучений при ускорении вращения тел, а затем в тепло носят квантовый характер.

К таким достижениям можно отнести и предположение о том, что тепловые колебания атомов, молекул в веществах – это неиссякаемый источник энергии. Резонанс собственных и вынужденных колебаний различных объектов-осцилляторов, в том числе атомов и молекул, позволяет увеличить амплитуду энергообмена с окружающей средой. При этом возрастает возможность получения наибольшего количества энергии при минимальных энергозатратах на возбуждающий генератор.

Использования геомагнитного поля в качестве источника новой энергии.

Предложенный метод получения электроэнергии от геомагнитного поля Земли – при помощи размещения замкнутых токовых контуров в космосе. Все это может служить направлением развития новых технологий для получения новых источников энергии.

### Рекомендуемая литература

- Усачев И.Н. Приливные электростанции. Москва. Энергия. 2002 г.
- Шейндлин А.Е. Проблемы новой энергетики. Москва. Наука. 2006 г.
- Месяц Г.А., Прохоров М.Д. Водородная энергетика и топливные элементы. Вестник РАН. 2004 г.
- Руденко Б. Подбирающие ветер. Наука и жизнь. 2005 г. №11.
- Цивинский С.В. Кавитационная термоядерная электростанция. Естественные и технические науки. 2006 г. №2. с.178-183.
- Голицын М.В., Голицын А.М. Альтернативные энергоносители. Москва. Наука. 2004г. 159с
- Б. С. Залогин. Океан и человек. Москва. Наука. 2006 г.
- Андреев Е.И. Основы естественной энергетики. СПб. Нев. Жемчужина. 2004 г. 582с.
- Власов С.И. Физика полупроводниковых приборов. Ташкент. НУУз. 2006 г.
- Власов С.И., Толипов Д.А. Пассивные полупроводниковые приборы. Ташкент. НУУз. 2012г.
- Месяц Г.А., Прохоров М.Д. Водородная энергетика и топливные элементы. Вестник РАН. 2004г. т.74. №7, с. 579 - 597.
- Борисенко В.Е. Нанoeлектроника - основа информационных систем XXI века. Соросовский Образовательный Журнал. 1997 г. № 2. С. 107-115.
- Потапов Ю.С., Фоминский Л.П., Потапов С.Ю. Энергия вращения. Москва. 2002 г.
- Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). СПб. Наука. 2008 г. 409 с.
- Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. Пер. с англ. Москва. Энергоатомиздат. 1990 г. 392 с.

## Глоссарий

**Альтернативный источник энергии** – способ, устройство или сооружение, позволяющее получать электрическую энергию (или другой требуемый вид энергии) и заменяющий собой традиционные источники энергии, функционирующие на нефти, добываемом природном газе и угле.

**Альтернативная энергетика** – совокупность перспективных способов получения энергии, которые распространены не так широко, как традиционные, однако представляют интерес из-за выгоды их использования и, как правило, низком риске причинения вреда окружающей среде в районе.

**Ветрогенератор** – устройство для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую энергию.

**Гидроэлектрическая станция (ГЭС)** – комплекс сооружений и оборудования, при помощи которых энергия потока воды преобразуется в электрическую энергию.

**Фотоэлемент** – электронный прибор, который преобразует энергию фотонов в электрическую энергию.

**Гидроволновой поплавковый преобразователь** – полузатопленная структура, состоящая из поплавков, связанных гидроцилиндрами.

**Гидросиловое оборудование** – комплекс, состоящий из пневмогидроаккумулятора и гидромотора. Гидромотор служит приводом для гидрогенератора, производящего электроэнергию.

**Приливная электростанция** – гидроэлектростанция использующая энергию приливов и отливов для получения электрической энергии.

**Волновая электростанция** – энергетическая установка, расположенная в водной среде, целью которой является получение электричества из кинетической энергии морских или океанических волн.

**Поплавковая электростанция** – гидроэлектростанция, использующая колебания морских и океанских волн для получения электрической энергии.

**Геотермальная электростанция** – электростанция, преобразующая тепловую энергию подземных источников в электрическую.

**Солнечный элемент** – полупроводниковая структура, преобразующая энергию солнечной радиации в электрическую энергию.

**Солнечная батарея** – совокупность солнечных элементов, непосредственно преобразующих энергию солнечной радиации в электрическую энергию.

**Солнечная электростанция** – инженерное сооружение, служащее преобразованию солнечной радиации в электрическую энергию.

**Концентраторы** – оптические устройства в виде зеркал или линз, в которых достигается повышение плотности потока солнечной энергии.

**Аккумуляторы** – химические источники тока. Заряд аккумулятора происходит тогда, когда к нему приложен потенциал, который больше напряжения аккумулятора.

**Биотопливо** – топливо, получаемое из биологического сырья.

**Биогаз** – продукт сбраживания органических отходов (биомассы), представляющий смесь метана и углекислого газа.

**Ядерный реактор** – устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, сопровождающаяся выделением энергии.

**Магнитогидродинамический генератор** – энергетическая установка, в которой энергия рабочего тела (жидкой или газообразной электропроводящей среды), двигающегося в магнитном поле, преобразуется непосредственно в электрическую энергию.

**Двигатель Стирлинга** – двигатель, работающий по замкнутому регенеративному циклу (цикл Стирлинга).

**Кавитация** – явление образования в капельной жидкости полостей заполненных газом, паром или их смесью.

**Трибоэлемент** – устройство, которое электризуется за счет механического трения,

**Магнитокалорический эффект** – изменение температуры магнитного материала при изменении напряженности магнитного поля, в котором он находится.

**Солнечная аэро – электростанция** – устройство, с помощью которого энергия солнечного излучения и ветра преобразуется в электрическую энергию.

**Осмоз** – диффузия вещества, обычно растворителя, через полупроницаемую мембрану, разделяющую раствор и чистый растворитель или два раствора различной концентрации.

**Осмотическая электростанция** – электростанция работающая на образовании осмотического давления.

**Пьезоэлектрический эффект** – возникновение электрических зарядов на поверхности вещества при его механической деформации.

**Пьезоэлектрическая поляризация** – поляризация, возникающая при механическом воздействии на диэлектрик, в структуре которого отсутствует центральная симметрия. При этом поляризованность линейно зависит от механического напряжения или механической деформации.

**Пьезоэлектрические генераторы** – генераторы, работающие на основе пьезоэлектрического эффекта

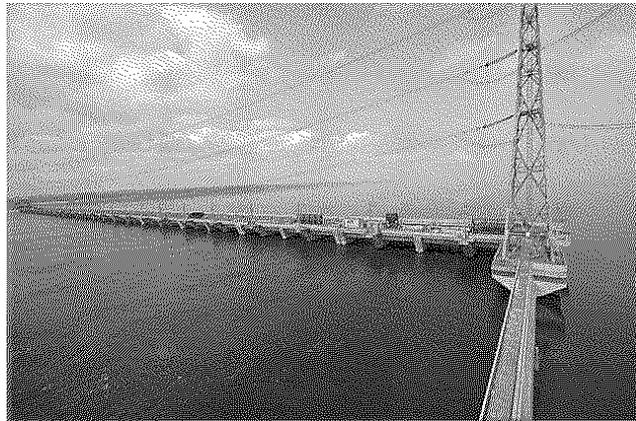
**Ионная упругая поляризация** – смещение ионов материала под действием внешнего электрического поля на расстояния меньше периода кристаллической решётки. Эта поляризация характерна для диэлектриков с ионным характером связи.

**Намагниченность** – магнитный момент единицы объёма материала, определяемый как векторная сумма магнитных моментов частиц материала, приходящаяся на единицу объёма материала.

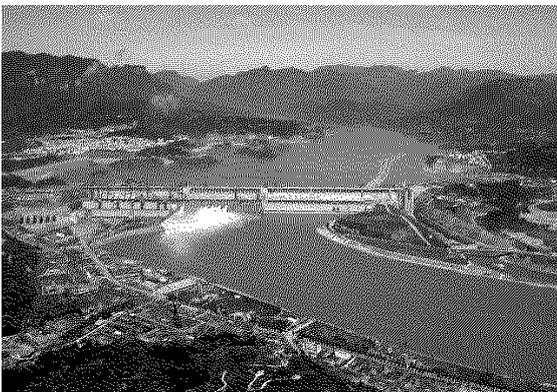
## Иллюстрации



**Внешний вид ГЭС «Гури»,  
расположенная на реке Карони**

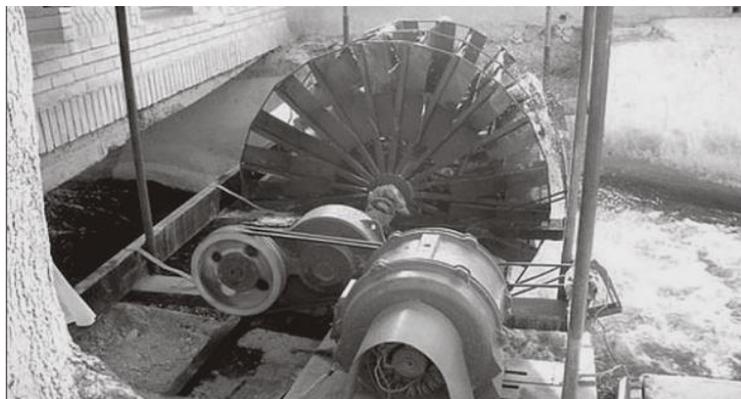


**Внешний вид Волжской  
гидроэлектростанции, расположенной на  
реке Волга**



**Тукуруйская гидроэлектростанция,  
расположенная в Бразилии, в графстве  
Тукуруи штате Тонкантинс, на реке  
Тонкантинс**

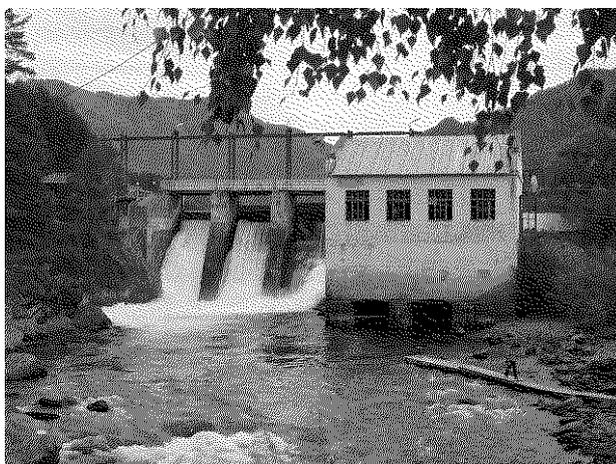
**ГЭС, которая строится в Китае под названием "Три ущелья". Она располагается на реке Янцзы и является самой большой электростанцией в мире, имеет мощность 22,40 ГВт.**



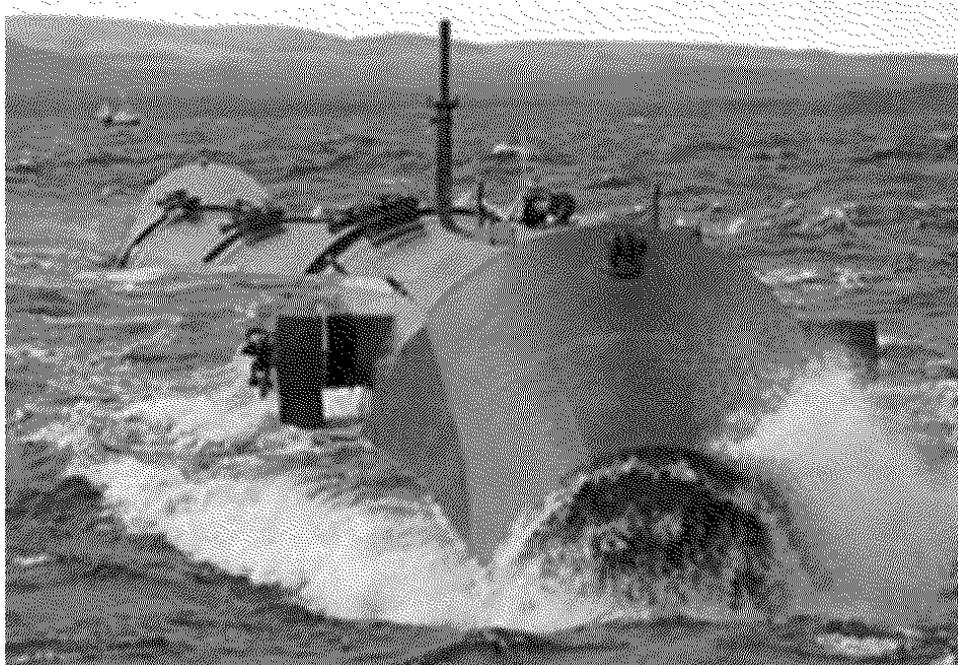
**Мини-ГЭС, мощностью 25 кВт/ч, изготовленная в Таджикистане**



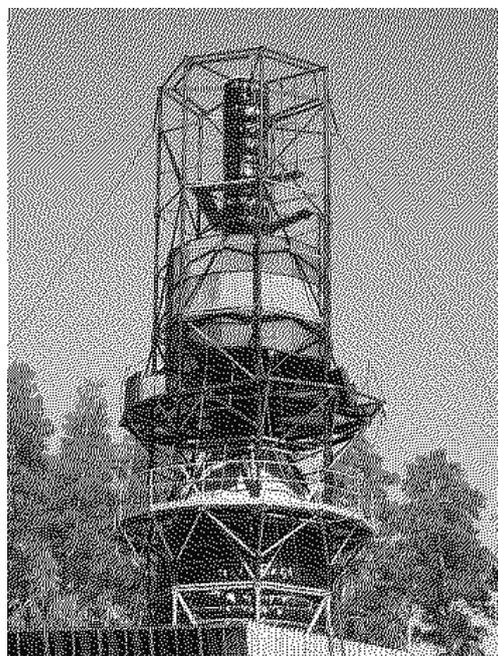
**Микро - ГЭС, установленная в Алтайском заповеднике**



**Мини-ГЭС, установленная в Мордовии**



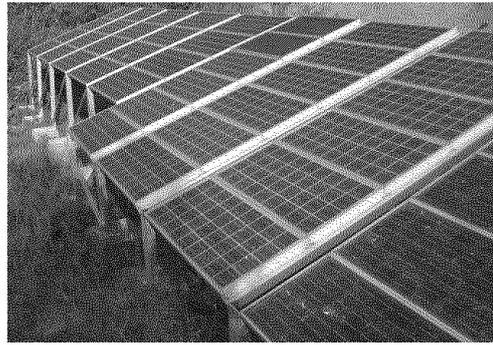
**Внешний вид волновой электростанции  
Pelamis P-750**



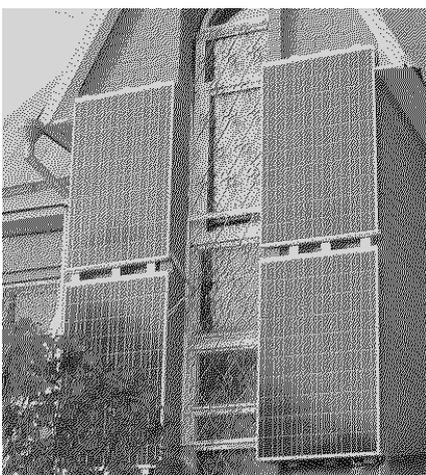
**Этапы строительства Бердской солнечно-ветровой теплоэлектростанции**



**Внешний вид солнечной электростанции мощностью 1 МВт.**



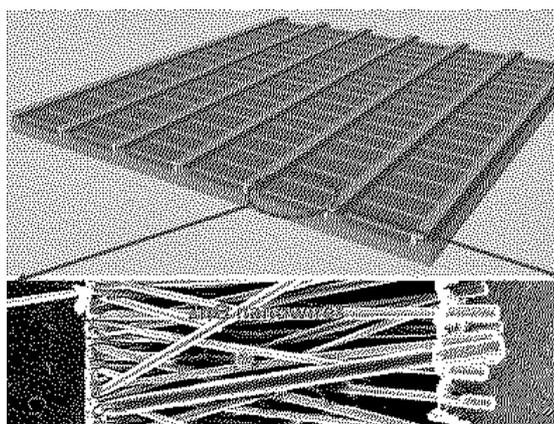
**Солнечные батареи, установленные на поверхности земли**



**Солнечные батареи, установленные на стене дома**



**Внешний вид мощных ветро генераторов**



**Наноразмерный пьезогенератор**

## Содержание

Лекция 1.	Введение.....	3
Лекция 2.	Гидроэнергетика.....	6
Лекция 3.	Атомная энергетика.....	11
Лекция 4.	Энергия приливов и отливов.....	15
Лекция 5.	Волновые электростанции.....	18
Лекция 6.	Энергия морских течений.....	26
Лекция 7.	Тепловая энергия океана.....	29
Лекция 8.	Гео и гидротермальная энергетика.....	39
Лекция 9.	Ветровая энергия.....	44
Лекция 10.	Солнечная энергетика.....	53
Лекция 11.	Фотоэлектрические преобразователи.....	62
Лекция 12.	Солнечные батареи.....	68
Лекция 13.	Космические солнечные станции.....	73
Лекция 14.	Энергия биомассы.....	77
Лекция 15.	Термоядерная энергия.....	82
Лекция 16.	Водородная энергетика.....	86
Лекция 17.	Двигатель Стирлинга.....	91
Лекция 18.	Кавитационные генераторы.....	95
Лекция 19.	Магнетогидродинамические генераторы.....	97
Лекция 20.	Использование энергии грозových разрядов.....	101
Лекция 21.	Использование энергии атмосферного электричества.....	110
Лекция 22.	Использование энергии постоянных магнитов.....	117
Лекция 23.	Солнечные аэро – электростанции.....	127
Лекция 24.	Осмотические электростанции.....	132
Лекция 25.	Пьезоэлектрические генераторы.....	137
Заключение	.....	146

Литература .....	148
Глоссарий .....	149
Иллюстрации .....	151
Содержание .....	155

Власов Сергей Игоревич  
Толипов Дамир Абидович

**Нетрадиционные источники энергии  
(Конспект избранных лекций)**

**Редактор С. Курбанов**

Подписано в печать 05.09.2012 . Формат 60x84 1/16. Учет. изд. листов 10  
Условно печат. лист. 10. Тираж 100 экз. Цена договорная. Заказ № 199  
Издательство «Университет» Ташкент 100174.  
Вуз городок. НУУзб.им. М. Улугбека. Административное здание.

Отпечатано в типографии НУУз им. М. Улугбека.