Некоммерческое акционерное общество

АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Кафедра электропривода
и автоматизации
промышленных
установок

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Конспект лекций
для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика

Алматы 2016

СОСТАВИТЕЛЬ: И.Т. Алдибеков. Возобновляемые источники энергии и энергосбережение. Конспект лекций для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика.- Алматы: АУЭС, 2016 – 106 с.

Конспект лекций по дисциплине «Возобновляемые источники энергии и энергосбережение» разработан в соответствии с учебной программой и рассчитан для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика.

Ил. 67, библ. – 18 назв.

Рецензент: канд.техн.наук, доцент Надиров Е.Г.

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2016 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2016 г.

Содержание

Введение……. 4
Лекция №1. Традиционные и нетрадиционные энергоносители. Стимулы использования и общая характеристика возобновляемых источников энергии ……... 5
Лекция №2. Использование солнца как источника электрической энергии. Солнечные термоэлектрические и фотоэлектрические преобразователи…… 11
Лекция №3. Режимы работы и характеристики фотоэлементов. Термодинамическое преобразование солнечной энергии в электрическую ……... 19
Лекция №4. Использование солнца как источника тепловой энергии. Плоские солнечные коллекторы……. ...…… 26
Лекция №5. Трубчатые вакуумированные солнечные коллекторы. Основные параметры солнечных коллекторов……..… 32
Лекция №6. Ветроэнергетика. Общая характеристика и перспективы использования энергии ветра. Работа ветрового колеса. Идеальный ветряк……. …… 39
Лекция №7. Ветроэнергетические установки…… 46
Лекция №8. Гидроэнергетика. Энергия движущейся воды. Структурные схемы и основные компоненты гидроэлектростанций…… 53
Лекция №9. Геотермальная энергетика. Использование геотермального тепла в системах теплоснабжения…… 60
Лекция №10. Использование геотермального тепла для выработки электроэнергии…… 66
Лекция№11. Энергетические ресурсы океана и их использование...…… 71
Лекция №12. Использование вторичных энергоресурсов …… 77
Лекция №13. Биоэнергетика. Производство и использование биотоплива……. 83
Лекция №14. Производство и использование биогаза. Экологические аспекты использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии……. 89
Лекция №15. Энергосбережение. Энергетический аудит……. 99
Список литературы ……...……... 106

Введение

Мировым сообществом признана необходимость перехода к устойчивому развитию, предполагающему поиск стратегии, обеспечивающей, с одной стороны – экономический рост и повышение уровня жизни людей, особенно в развивающихся странах, с другой – снижение негативного влияния деятельности человека на окружающую среду до безопасного предела, позволяющего избежать в долгосрочной перспективе катастрофических последствий. В переходе к устойчивому развитию важная роль будет принадлежать новым энергетическим технологиям и источникам энергии, в том числе возобновляемым источникам энергии.

Возобновляемые ресурсы и альтернативные источники энергии – важнейший аспект развития казахстанской экономики и фактор обеспечения энергетической безопасности страны на длительную перспективу.

В Республике Казахстан создание и развитие энергетики на базе возобновляемых энергетических ресурсы определено законами РК « Об энергетике», «Об энергосбережении» и «Стратегия развития государства до 2030 года» «О поддержке использования возобновляемых источников энергии» и рядом постановлений правительства.

Одной из важных задач в области освоения возобновляемых источников энергии является подготовка кадров для разработки, производства и эксплуатации энергоустановок, работающих на нетрадиционных и возобновляемых энергетических ресурсах.

Целью дисциплины «Возобновляемые источники энергии и энергосбережение», изучаемой студентами по специальности «5В071800 – Электроэнергетика», является формирование у бакалавров системы знаний по научно-техническим основам использования возобновляемых источников в энергетических процессах государственных и автономных систем электро- и теплоснабжения, обеспечивающих решение задач энерго- и ресурсосбережения.

Данный конспект лекций включает 15 лекций, в которых приведены классификация возобновляемых источников энергии, энергетические ресурсы и стимулы их использования, дано описание принципов построения и конструктивных особенностей солнечных и геотермальных электростанций и систем теплоснабжения, рассмотрены классификация, устройства, принципы работы ветроэнергетических установок, океанских электростанций, малых гидроэлектростанции и их энергетические характеристики, приведены сведения о вторичных энергетических ресурсах, биотопливе и возможностях их использования. Показаны особенности применения энергоустановок на базе возобновляемых источников энергии для децентрализованного электро- и теплоснабжения, а также экологические аспекты их использования. Рассмотрены вопросы энергосбережения и приведены сведения о энергоаудите.

Лекция №1. Традиционные и нетрадиционные энергоносители. Стимулы использования и общая характеристика возобновляемых источников энергии

Содержание лекции: традиционные энергоносители, экологические аспекты их использования, виды нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ) и актуальность их использования, общая характеристика НВИЭ и технические проблемы использования НВИЭ, энергетическая программа РК и место НВИЭ в ней.

Цель лекции: показать актуальность вовлечения в энергобаланс ВИЭ для устойчивого развития государств, а также ознакомить студентов с общими характеристиками НВИЭ и техническими проблемами их использования, законами РК по стратегии развития НВИЭ.

Традиционные энергоносители и экологические аспекты их использования. Энергия состоит из частей: живой, активной энергии, способной производить работу и пассивной, не способной производить работу в данных условиях. Живую энергию называют *эксергией*, пассивную энергию называют *энтропией*.

Гигантские потоки энергии Солнца, приливов и отливов мирового океана, ветра, энергия рек и поступающее на поверхность внутреннее тепло Земли в итоге превращаются в энтропию околоземного пространства. По отношению к космосу энтропия поверхности и атмосферы Земли является эксергией, она переходит в космос и рассеивается в безграничном космическом пространстве. Благодаря этому на Земле существует тепловое равновесие и возможна Жизнь.

Неуклонное увеличение населения Земли, стремление к высоким стандартам жизни, особенно в развитых странах, ведет к росту потребности в энергии. Энергетика становится главным столпом экономик всё возрастающего числа стран. Это ведет к возникновению глобальных противоречий человека со Средой обитания (так всё чаще называют Природу) и нарушению теплового равновесия Земли с Космосом. Это происходит из-за того, что получение *наиболее востребованных видов энергии – электрической* (очень удобной для применения, конвертации), *тепловой* (для обогрева и осуществления многих технологических процессов), а также *механической* (для обеспечения технологических операций и движения транспортных средств) в настоящее время осуществляется преимущественно путём сжигания различных *традиционных первичных видов углеводородного топлива* в кислороде воздуха.

К первичным (стоящим в начале «энергетической цепочки») относят энергоресурсы в первую очередь:

- *традиционные* (*основные*): уголь, нефть, газ, уран и энергия вод;
- *нетрадиционные возобновляемые;*

- и ранее ограничено применявшиеся *нетрадиционные невозобновляемые* энергоресурсы.

Путем преобразования *первичных* получают для непосредственного применения *вторичные* энергоресурсы (чаще всего - это электроэнергия).

Показатель полезного использования химической энергии, содержащейся в углеводородном сырье редко превышает 30%. Остальная часть – 70% - миллиарды гигакалорий – рассеивается в окружающем пространстве и должна уходить в Космос для поддержания теплового баланса Земли. Однако при работе производственных и энергетических объектов, сжигающих ежегодно миллиарды тонн угля, нефти, природного и попутного газа, других видов топлива образуются так называемые «парниковые газы» и другие соединения. *Парниковые газы* – продукты сгорания и другой техногенной деятельности человека скапливаются в верхних слоях атмосферы и образуют слой, обуславливающий изменение её свойств, он «запирает» инфракрасное излучение, образующееся на поверхности Земли. Это препятствует рассеиванию тепловой энергии в космическом пространстве. Возникает «*парниковый эффект*»**,** повышается средняя температура планеты.

Существующая практика инвентаризации МГЭИК включает шесть основных парниковых газов:

Двуокись углерода (CO_2) - (диоксид углерода, углекислый газ) - высокого давления и низкотемпературную получают из отбросных газов производств аммиака, спиртов, а также на базе специального сжигания топлива и других производств. Двуокись углерода применяется для создания защитной среды при сварке металлов, для пищевых целей и других целей во всех отраслях промышленности.

Метан (CH_4) - гораздо более «сильный» парниковый газ, чем двуокись углерода. Сырьё для получения многих ценных продуктов химической промышленности - формальдегида, ацетилена, сероуглерода, хлороформа, синильной кислоты, сажи. Применяется как топливо.

Закись азота (N_2O) – «веселящий газ». Основное применение: обезболивание при выполнении медицинских процедур, требующих отключения сознания.

Гидрофторуглероды - ГФУ (Hydrofluorocarbons – HFCs) - углеводородные производные, состоящие из одного или большего числа галогенов, которые частично замещают водород.

Перфторуглероды – ПФ (Perfluorocarbons - PFCs) - единственным известным основным источником эмиссий этих газов является плавка алюминия. При алюминиевой плавке эмиссии ПФУ возникают в электрической дуге или при так называемых «анодных эффектах».

Гексафторид серы (SF_6) - является в 22 200 раз более эффективным парниковым газом, чем CO2, в расчете на килограмм. Он высвобождается из антропогенных источников, чрезвычайно долго сохраняется в атмосфере и является активным поглотителем инфракрасного излучения.

В результате «парникового эффекта» возникают чрезвычайные, ранее не регистрировавшиеся природные явления – наводнения, цунами и затопления больших территорий и городов Индонезии, Индокитая, Европы, Америки, Индии, Японии…, оползни, сели. Экономический ущерб и людские жертвы при этом бывают огромными. Причиной этих катаклизмов является повышение температуры поверхности Земли на 0,5…1,5 ^{0}С, а в отдельных местах на 3,0^{0}С за счет «парниковых газов». В среднем температура атмосферы повышается на 1,5^0 в десятилетие. Тают и уменьшаются по толщине и площади ледяные покровы Арктики и Антарктики. Уменьшаются запасы влаги в виде вечных снегов высокогорий.

«Большую» гидроэнергетику и «атом» также относят к традиционным источникам энергии. Они также экологически «нечисты». Атомные электростанции (АЭС) должны строиться и эксплуатироваться по высочайшим стандартам надёжности (вспомним Чернобыль и Фукусиму), серьёзной проблемой является также утилизация отработавшего ядерного топлива. В то же время во Франции, например, 80%, в Бельгии – около 60 %, в России – 15 %. электроэнергии вырабатывается на АЭС.

При строительстве крупных гидроэлектростанций создаются высотные плотины (до 200…300 м), затапливаются и выводятся из оборота громадные площади полей, лесов, терпят ущерб сельское и рыбное хозяйство и т.д.

Вместе с тем запасы традиционных энергетических ресурсов (угля, нефти, газа, урана и др.) конечны (кроме энергии вод). Их прогнозные запасы оцениваются, соответственно, в 15 трлн т., 500 млрд т. и 400 трлн м^3, при разведенных запасах 1685 млрд т., 137 млрд т. и 140 трлн м^3. Более или менее достоверные мировые запасы урана оценивается в 1,5 млн т.

При современном уровне добычи разведенных запасов угля хватит на 400 лет, нефти - на 42 года и газа – 61 год. Естественно, со временем часть прогнозных ресурсов также будет освоена, но стоимость их добычи будет расти. При экстенсивной эксплуатации, по оценкам экспертов, сегодняшних запасов нефти в Казахстане хватит на 70 лет, природного газа – на 85 лет.

Традиционные ископаемые энергоносители даются людям в результате целенаправленных тяжких трудов (порой небезопасных) и громадных капитальных вложений. Считается, что первая треть века пройдёт под знаком традиционной энергетики с постепенным переходом к нетрадиционным энергоресурсам. Человечеству нужна энергия, причем потребность в ней увеличивается с каждым годом. Всё возрастающая доля энергопотребностей может быть удовлетворена за счет других источников энергии – *нетрадиционных* (возобновляемых и невозобновляемых). *Это потоки энергии, постоянно существующие или периодически возникающие в окружающей среде.* Ценное свойство нетрадиционных источников в том, что фактически в любой точке Планеты найдется какой-либо ресурс (чаще «ветер», «солнце»), который можно «задействовать по месту».

Нетрадиционные источники энергии. В 1978 году Генеральной Ассамблеей ООН был утвержден список нетрадиционных и возобновляемых

источников энергии. *Нетрадиционные (альтернативные) источники энергии* – это:

а) возобновляемые (неистощаемые) источники энергии (*Н*ВИЭ), к ним относятся:

- солнечная энергия, ветровая энергия, геотермальная энергия, энергия морских и океанских течений, энергия волн и приливов, энергия температурного градиента морской воды, энергия текущей и падающей воды рек и каналов, энергии низкопотенциального тепла земли, воздуха, воды, кроме того, это энергия биомассы животного и растительного происхождения, торф (при условии их умеренного потребления с воспроизводством);

б) до сих пор ограниченно применяющиеся энергоресурсы:

- новые виды жидкого и газообразного топлива, представленные синтетической нефтью на основе угля, горючих сланцев и битуминозных пород (дополнительные углеводородные ресурсы); твердые бытовые и прочие отходы; попутный газ (при разработке нефтяных месторождений); а также спирты и топливо для транспортных средств, добываемое из биомассы, и водород.

Нетрадиционная возобновляемая энергия не является следствием целенаправленной деятельности человека (в этом ее отличительный признак от традиционных ресурсов, которые всё труднее людям достаются), *она подарена Природой.* Потенциальные возможности НВИЭ огромны и составляют в год: солнечная энергия – 2300 млрд т. усл. топл.; ветровая энергия – 26,7 млрд т. усл. топл.; геотермальная энергия; энергия морских и океанских течений – 30 млрд т. усл. топл.; энергия малых рек – 360 млрд т. усл. топл.; энергии низкопотенциальных источников - 530 млрд т. усл. топл.; энергия биомассы - 10 млрд т. усл. топл.

В сценарии Мирового энергетического Совета предусматривается к 2050 г. увеличение *доли использования ВИЭ до 40%.* Европейский Союз взял на себя обязательства довести данный показатель до 20% к 2020 г. и до 30% - к 2040 г. Это притом, что в данное время НВИЭ в мировой структуре энергопотребления занимают порядка 7%.

В Казахстане на сегодняшний день доля возобновляемых источников составляет около 15% топливно-энергетического баланса и представлена практически только «большой» гидроэнергетикой. *Доля альтернативных (нетрадиционных) источников составляет 0,3-0,4%***.** Подобная ситуация не может считаться приемлемой, учитывая огромный потенциал и значительную целесообразность развития НВИЭ в РК.

Стимул к переходу на альтернативные нетрадиционные источники энергии. П*ервый и главный стимул* к переходу на альтернативные нетрадиционные источники энергии - быть готовыми к окончанию «века пара» (фактически он всё ещё продолжается «в лице» циклопических ТЭС-основе современной энергетики) по всему миру.

Второй стимул к переходу на «зеленую» энергетику с использованием

возобновляемых энергетических ресурсов - предотвратить экологическую катастрофу и сохранить природу для будущих поколений

Третий стимул развития "*зеленой*" *энергетики* - обеспечение энергией людей, проживающих в регионах, удалённых от существующих систем энергоснабжения. Для создания местных энергетических систем, используются комплексные энергетические установки мощностью 50 – 250 кВт – ветровые, солнечные и дизельные агрегаты.

Ч*етвертый стимул* развития энергетики на НВИЭ - снижение уровня политических интриг и военных акций за владение традиционными энергетическими ресурсами – нефтью, природным газом, углем.

Пятый стимул - энергетические ресурсы *Ветра и Солнца* не являются объектом монопольного владения, *они даны поровну всем и каждому*.

Широкое внедрение технологий НВИЭ позволит решить проблемы:

- *снижения существенного отрицательного воздействия* повсеместно превалирующей традиционной теплоэнергетики;

- *удовлетворения потребностей в энергии значительной части населения*, проживающих в районах, расположенных вдали от линий электропередач (ЛЭП);

- *ограничения применения органического топлива* в тепловых процесах и сохранение его как сырья для химической промышленности.

Поэтому НВИЭ следует рассматривать на достаточно продолжительный период (по крайней мере на первую треть XXI в.) не как альтернативу традиционной энергетике**,** *а как дополнительный источник энергии*, решающий важные экологические и социально-экономические задачи.

Основное преимущество, общие свойства и признаки НВИЭ. Основное преимущество НВИЭ — *неисчерпаемость и экологическая чистота* (по крайней мере сравнительная). Потенциальные возможности НВИЭ не ограничены. Их использование не изменяет энергетический баланс планеты.

Общими свойствами и признаками НВИЭ являются следующие:

а) *цикличность* – суточная и сезонная (весна, лето, осень, зима), связанные с вращением Земли и изменением наклона оси ее вращения, Солнечными 11-летними циклами;

б) *зависимость интенсивности проявления энергетической активности* этих источников от состояния атмосферы – ее оптической плотности, связанной с наличием в ней влаги – облаков, твердых частиц – дыма, пыли, а также от рельефа местности, загруженности территорий строениями разной величины, создающими затенения;

в) *низкая концентрация (плотность) энергии*, что требует вовлечения бóльших площадей, объёмов, масс в процесс преобразования НВИЭ.

г**)** *необходимость использования накопителей* стихийно поступающей энергии для энергетических установок для использования ее по мере необходимости в разное время. В качестве накопителей энергии наиболее доступными являются электрические аккумуляторы;

д) *мощные преобразователи ветровой и солнечной энергии* должны

объединяться с энергетическими системами, способными поглотить всю вырабатываемую ими энергию по любому режиму и графику её поступления;

е) *преобразование НВИЭ* в наиболее пригодные формы ее использования – электричество или тепло – на уровне современных знаний и технологий *обходится довольно дорого*.

В настоящее время из-за технических проблем использования НВИЭ, а именно, *несовершенства техники и технологии НВИЭ, отсутствия необходимых конструкционных и других материалов* пока не удается широко вовлекать НВИЭ в энергетический баланс.

Вместе с тем особенно заметен в мире научно-технический прогресс в сооружении НВИЭ-установок и в первую очередь: фотоэлектрических преобразований солнечной энергии (фотовольтаики), ветроэнергетических агрегатов и в переработке биомассы.

Основные положения Киотского протокола. Стратегию развития энергетики на неисчерпаемых и возобновляемых энергетических ресурсах определяют Международные соглашения. Большую роль здесь играет Киотский протокол, к выполнению принципов которого подключилось большинство стран мира, в том числе Республика Казахстан.

Киотский протокол - международный документ, принятый на 3-ей сессии Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в декабре 1997 г. в Киото, Япония. Это протокол по сокращению выбросов парниковых газов в 2008 – 2012 гг., вступивший в силу 16 февраля 2005 года. Документ предусматривает, что в период с 2008 по 2012 годов общий объем выбросов в атмосферу двуокиси углерода, метана и других парниковых газов должен быть сокращен на 5,2% по сравнению с уровнем 1990 года. Страны имеют определенные лимиты на выбросы в парниковых газов атмосферу. Если какая-либо страна не использует полностью свои лимиты, то она имеет право их продать как неиспользованные квоты.

Согласно Протоколу, Евросоюз должен сократить выбросы на 8 %, Япония и Канада – на 6 %, страны Восточной Европы и Прибалтики – в среднем на 8 %, Россия и Украина – сохранить среднегодовые выбросы в 2008 – 2012 годах на уровне 1990 года. Развивающиеся страны, включая Китай и Индию, не были обременены обязательствами. Соединенные Штаты Америки заявили о неучастии в протоколе до 2013 года.

Казахстан присоединился к Рамочной конвенции ООН по изменению климата в 1995 году, ратифицировал Киотский протокол в марте 2009 года.

Потенциальные возможности и основные мотивы использования НВИЭ в РК. Казахстан имеет огромные возможности использования ВИЭ:

- по солнцу: продолжительность солнечного сияния составляет 2200 - 3000 часов в год, а энергия этого сияния достигает 1300 - 1800 кВт/ч. В год суммарная дневная радиация по республике составляет 3,8-5,2 кВт/ч·м^2, это один из лучших показателей в мире;

- по ветру: энергетический потенциал ветра оценивается на уровне 1,8 трлн кВт/ч. Только в районе Джунгарских ворот и Шелекского коридора, где

средние годовые скорости ветра составляют 7,9 м/с и 5-9 м/с, соответственно;

- гидропотенциал Республики оценивается в 170 ТВт в год. На сегодня из них вырабатываются лишь 78 ТВт в год. Большие перспективы принадлежат малым гидроэлектростанциям общей мощностью 1380 МВт. Учеными установлено большое преимущество безплотинных микроГЭС.

Основные мотивы разработки возобновляемых ресурсов в Казахстане:

– *замещение импорта электроэнергии*, особенно, в южных регионах, экологически чистыми и конкурентоспособными ВИЭ;

– *расширение доступа к электроэнергии* для населения отдаленных населенных пунктов и кочевий;

– *защита экосистемы* страны путем уменьшения зависимости энергосистемы от выработки электроэнергии на основе угля (составляющей в настоящее время около 85 процентов), которая оказывает серьезное воздействие на окружающую среду;

– *снижение потерь* на линиях электропередач и усовершенствование стабильности и надежности с использованием ВИЭ;

– *снижение выбросов* CO_2 при энергетической деятельности путем распространения установок ВИЭ.

В РК использование ВИЭ определено законодательными актами РК:

1) « О поддержке использования возобновляемых источников энергии»: утв. 4 июля 2009 года, № 16-IV.

2) «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности»: утв. 13 января 2012 года, № 541-IV.

3) Указ Президента Республики Казахстан. «О Концепции по переходу Республики Казахстан к зеленой экономике»: утв. 30 мая 2013 года.

4) « Стратегия развития государства до 2030 года».

5) Государственная Программа развития энергетики до 2030 г, которая предусматривает ввод 1460 МВт мощностей гидростанций в Южных и Восточных регионах, в том числе 300 МВт к 2015 году, 520 мощностей ветростанций, в том числе строительство пилотной ветроэлектростанции в Джунгарских воротах, применение солнечных преобразователей энергии «фотовольтаики», тепловых солнечных коллекторов и тепловых насосов для горячего водоснабжения и отопления.

Лекция №2. Использование солнца как источника электрической энергии. Солнечные термоэлектрические и фотоэлектрические преобразователи

Содержание лекции: общая характеристика солнечного излучения, классификация солнечных энергетических установок, солнечные термоэлектрические и фотоэлектрические преобразователи.

Цель лекции: изучить энергетические возможности солнечной энергии и способы и устройства для ее преобразования в электрическую энергию.

Общая характеристика солнечного излучения. В 1996 году на Всемирной встрече по проблемам солнечной энергии (г.Хараре, Зимбабве) приняты «Всемирная солнечная программа» и «Харарская Декларация по солнечной энергетике и устойчивому развитию», определившие, что солнечная энергия должна играть заметную роль в *обеспечении энергией, сохранении использования природных ресурсов и уменьшении деградации окружающей среды*.

Источник лучистой энергии - Солнце - ближайшая к Земле звезда, раскалённый плазменный шар радиусом 696 тыс.км. Светимость Солнца $3{,}86 \cdot 10^{23}$ кВт, эффективная температура поверхности около 6000 К, состав: водород - около 90%, гелий – 10%, другие элементы – менее 0,1%.

Источник энергии Солнца – ядерные превращения водорода в гелий в центральной области Солнца, где температура около 15 млн К. Энергия из недр Солнца к его поверхности переносится излучением, а затем во внешнем слое, толщиной около 0,2 радиуса шара – конвекцией. Конвективное движение плазмы определяет наличие фотосферной грануляции - солнечных пятен. Интенсивность плазменных процессов на Солнце периодически – через 11 лет меняется. На Землю, находящуюся от Солнца на расстоянии 149 млн км поступает поток солнечной лучистой энергии мощностью около $2\ 10^{17}$Вт.

Солнечный спектр можно разделить на три основные группы: *ультрафиолетовое излучение* (длины волны до 0,4 мкм) – 9% интенсивности; *видимое излучение* (длины волны от 0,4 мкм до 0,7 мкм) – 45% интенсивности; *инфракрасное (тепловое)* излучение (длины волны более 0,7 мкм) – 46 % интенсивности.

Для количественной оценки излучения применяется величина, называемая интенсивностью. *Интенсивность* E_c [Вт/м^2] – эта мощность лучистой энергии, приходящей за пределами земной атмосферы в секунду на квадратный метр площади, перпендикулярной солнечным лучам.

При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется, в основном за счет поглощения излучения парами воды – облаками (инфракрасное излучение), озоном (ультрафиолетовое излучение), частицами пыли, золы, дыма и аэрозолей, за счет рассеяния светового потока молекулами газов. Все эти поглощения света образуют понятие – *оптическая плотность атмосферы или атмосферная масса* (АМ).

При нулевой атмосферной массе АМ0 на верхней границе атмосферы и в космическом пространстве интенсивность равна Ес = 1360 Вт/м².

Величина атмосферной массы АМ1 соответствует оптической плотности чистого безоблачного неба над уровнем моря при расположении Солнца в зените. *Стандартной величиной атмосферной массы является АМ1,5* при $\theta = 41°49'$, при которой плотность излучения Ес = 835 Вт/м².

Квант электромагнитного излучения – *фотон* - элементарная частица, обладающая нулевой массой покоя и скоростью, равной скорости света. Она не имеет ни электрического заряда, ни магнитного момента. Энергия фотонов hν=[эВ], в излучении с длиной волны λ определяется соотношением

$$h\nu = hc\backslash \lambda = 1{,}24\backslash \lambda, \qquad (2.1)$$

где h=6,63·10^{-34} Дж·с – постоянная Планка;

с= 2,99·10^{8} м/с - скорость света;

λ – длина волны, мкм.

Электрон-вольт – работа, необходимая для перемещения электрона между двумя точками с разностью потенциалов 1В. 1 эВ =1,6·10^{-19} Дж.

Граничная длина волны, начиная с которой фотоны будут поглощаться в материале солнечного элемента с шириной запрещенной зоны E_g: $\lambda_{гр}$= 1,24/ E_g.

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

Солнечное излучение на поверхность Земли зависит от многих факторов: широты и долготы местности; географических и климатических особенностей; состояния атмосферы; высоты Солнца над горизонтом; размещение приемника солнечного излучения на Земле; размещение приемника солнечного излучения по отношению к Солнцу и т. д.

Суммарное солнечное излучение, достигающее поверхности Земли, обычно *состоит из трех составляющих*:

1) *Прямое солнечное излучение,* поступающее от Солнца на приемную площадку в виде параллельных лучей.

2) *Диффузионное или рассеянное* молекулами атмосферных газов и аэрозолей солнечное излучение.

3) *Отраженная* земной поверхностью доля солнечного излучения.

Классификация солнечных энергетических установок. Солнечная энергия на Земле используется с помощью солнечных энергетических установок, которые можно классифицировать по следующим признакам:

– по виду преобразования солнечной энергии в другие виды энергии – *тепло или электричество*;

– по концентрированию энергии – *с концентраторами и без концентраторов;*

– по технической сложности – *простые* (нагрев воды, сушилки, нагревательные печи, опреснители и т. д.) *и сложные*.

Сложные солнечные энергетические установки можно разделить на два подвида. *Первый* базируется в основном на системе преобразования солнечного излучения в тепло, которое далее используется в обычных схемах ТЭЦ. К таким установкам относятся башенные солнечные электрические станции, солнечные пруды, солнечные установки с параболоцилиндрическими концентраторами. Сюда же относятся и солнечные коллекторы, где вода нагревается солнечным излучением.

Второй подвид солнечных энергетических установок базируется на прямом преобразовании солнечного излучения в электроэнергию с помощью солнечных фотоэлектрических установок. В настоящее время в мире наиболее перспективными являются:

– *солнечные коллекторы;*

– *солнечные фотоэлектрические преобразователи*.

Термоэлектрические преобразователи. В основе прямого преобразования тепловой энергии солнечного излучения в электричество лежит эффект Зеебека, открытый в 1821 году. Если спаять концами два проводника разного химического состава и поместить спаи в среды с разными температурами (рисунок 2.1), то между ними возникает термоЭДС:

$$E=\alpha(T_1-T_2), \tag{2.2}$$

где T_1 – абсолютная температура горячего спая;

T_2 – абсолютная температура холодного спая;

α – коэффициент пропорциональности.

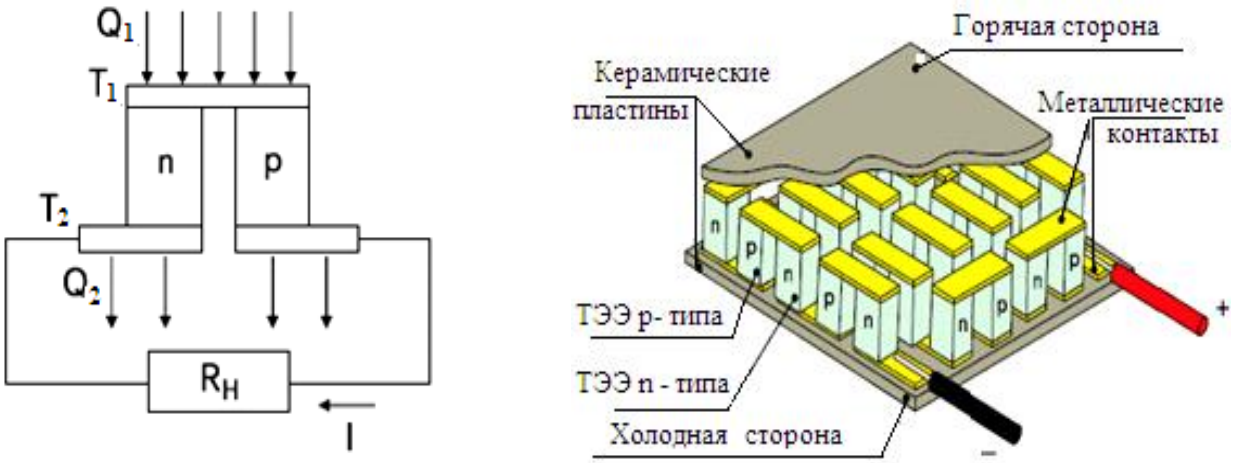


Рисунок 2.1 – Конструкция термоэлектрического преобразователя

КПД идеального термоэлектрического преобразователя совпадает с термическим КПД цикла Карно и полностью определяется абсолютными температурами холодного и горячего спаев. В реальных преобразователях имеют место потери из-за электрического сопротивления проводников, их теплопроводности и термического сопротивления теплообмену спаев с окружающими средами. Поэтому действительный КПД установки равен:

$$\eta = \eta_{оэ}\frac{(T_1 - T_2)}{T_1}, \tag{2.3}$$

где $\eta_{оэ} < 1$ – относительный электрический КПД преобразователя.

При *использовании металлических термоэлектродов КПД* термоэлектрических преобразователей очень мал – *не превышает сотых долей процента*. Значительный эффект дает *применение полупроводников – КПД* возрастает до величины порядка 10 %**.**

В современных солнечных полупроводниковых термоэлектрических генераторах, в которых *горячие спаи нагреваются солнечными лучами,* соединены последовательно. Такого рода генераторы применяются в качестве автономных источников электроэнергии для потребителей малой мощности – маяков, морских сигнальных буев и т.п.

Максимальная рабочая температура самых распространенных термоэлектрических генераторов – 200-250°С. Напряжение, ток, мощность – порядка 2В, 1А, 2Вт соответственно.

Фотоэлектрические преобразователи. Фотоны взаимодействуют электромагнитным образом со всеми элементарными частицами, создают процессы – излучение, поглощение, упругое рассеяние энергии. Под действием потока фотонов в некоторых полупроводниках возникает внутренний фотоэффект, при котором происходит переход носителей зарядов из связанного состояния в свободное и скопление их на $p - n$ переходах, создающее разность потенциалов на поверхностях элемента.

Вентильный фотоэффект или фотоэлектрический эффект – это возникновение ЭДС в системе, содержащей контакт двух разных полупроводников или полупроводника и металла при поглощении квантов излучения оптического диапазона.

Фотоэлемент - электронный прибор, который преобразует *энергию фотонов в электрическую энергию*. Действие прибора основано на фотоэлектронной эмиссии или внутреннем фотоэффекте.

Наиболее эффективными, с энергетической точки зрения, устройствами для превращения солнечной энергии в электрическую являются *полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП),* поскольку это прямой, одноступенчатый переход энергии. КПД производимых в промышленных масштабах фотоэлементов в среднем составляет 10-18 %, у лучших образцов до 25 %. В лабораторных условиях уже достигнуто КПД около 44,7 %.

Материалы для изготовления полупроводников. Преобразование энергии в ФЭП основано на *фотоэлектрическом эффекте*, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах (т.е. в фотоэлементе, состоящего из двух полупроводников разной проводимости) при воздействии на них солнечного излучения.

Для получения этого эффекта используются специальные вещества – *полупроводники.* Они бывают двух типов: с p- и n-проводимостью: *n-проводимость* означает избыток электронов в веществе, *p- проводимость*, соответственно, - их недостаток.

Неоднородность структуры ФЭП может быть получена:

- *легированием* одного и того же полупроводника различными примесями (создание p-n переходов), например, кремний с добавкой фосфора для получения слоя с n-проводимостью, кремний с добавкой бора для получения слоя с p-проводимостью (дырочная проводимость;

- *путём соединения различных полупроводников с неодинаковой шириной запрещённой зоны* - энергии отрыва электрона из атома (создание гетеропереходов);

- *за счёт изменения химического состава полупроводника*, приводящего к появлению градиента ширины запрещённой зоны (создание варизонных структур).

Среди ФЭП условно выделяют несколько типов по применяемому в производстве материалу (в порядке уменьшения КПД):

- *арсенид галлия* (жесткие, тяжёлые модули с КПД 10-25%, сохраняют работоспособность до температур +150°С, спектр – «видимый»);

- *монокристаллический кремний и поликристаллический кремний* (жесткие, КПД 12-20% – уменьшается при нагреве - 0.45%/°С, считая от +25°С, спектр – «видимый + инфракрасный»);

- *аморфный кремний* (гибкие батареи, КПД 5-10%, спектр – «ультрофиолет+видимый»);

- *сульфидно-кадмиевые* (тонкоплёночные, гибкие, КПД 5-10% – стабилен до температур +100°С, спектр – «ультрафиолет + видимый»);

- *CIGS* – соединения меди, индия, галлия и селена.

Основной недостаток арсенида галлия – высокая стоимость.

Кремний до сих пор остается основным материалом для производства фотоэлементов. Запасы его огромны. Однако в промышленном его использовании есть одна большая проблема — его очистка, поэтому чистый кремний стоит дорого. Перспективными считаются соединения меди, индия, селена, галлия и кадмия, а также органические фотоэлементы.

На основе кремния производятся фотопанели трех видов:

а) *из монокристаллов*. Для их изготовления выращиваются монокристаллы с однородной структурой. В результате такие фотоячейки отличаются равномерной поверхностью и, как следствие, лучше поглощают солнечные лучи. Иными словами, их КПД выше, чем у других видов, но при этом они стоят несколько дороже. Эти ячейки имеют вид квадратов со скошенными углами или многоугольников, что объясняется формой монокристаллической кремниевой заготовки;

б) *из поликристаллов*. Такие ячейки имеют неоднородную, поликристаллическую, структуру. Их светопоглощение несколько ниже, чем у моноячеек, поскольку неравномерная поверхность отражает часть лучей;

в) *на тонких пленках*. Принцип работы таких солнечных батарей аналогичен кристаллическим. Но выпускаются они в виде гибких ячеек, которые можно устанавливать на криволинейных поверхностях. Эти батареи дешевы в производстве, и довольно эффективны, но для бытовых целей

применяются редко, поскольку по сравнению с кристаллическими занимают большую площадь (примерно в 2,5раза) на единицу мощности.

Поликристаллические тонкие пленки также весьма перспективны для солнечной энергетики. Чрезвычайно высока способность к поглощению солнечного излучения у диселенида меди и индия ($CuInSe_2$) – 99 % света поглощается в первом микроне (ширина запрещенной зоны – 1,0 эВ).

Среди солнечных элементов особое место занимают батареи, использующие *органические материалы***.** Коэффициент полезного действия солнечных элементов на основе диоксида титана, покрытого органическим красителем, весьма высок – ~11 %.

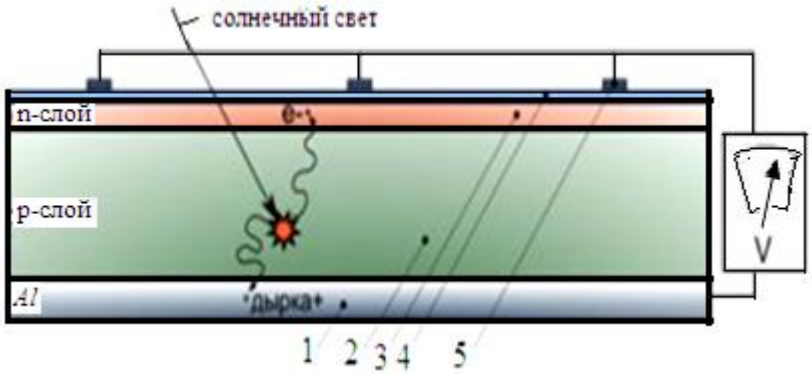
Теллурид кадмия (CdTe) – еще один перспективный материал для фотовольтаики. У него почти идеальная ширина запрещенной зоны (1,44 эВ) и очень высокая способность к поглощению излучения. Пленки CdTe достаточно дешевы в изготовлении. Кроме того, технологически несложно получать разнообразные сплавы CdTe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

Самый первый в мире фотоэлемент появился в 1883 году в лаборатории Чарльза Фриттса. Он был изготовлен из селена, покрытого золотом, его КПД был очень низким около 1% . В недрах лаборатории компании «Bell Telephone» *был создан первый элемент на кремнии***.**

Устройство и принцип фотоэлемента. Фотоэлемент на основе полупроводников состоит из алюминиевой подложки, двух слоев полупроводников с разной проводимостью, защитного антибликового стекла и отрицательных электродов (рисунок 2.2). К слоям с разных сторон подпаиваются контакты, которые используются для подключения к внешней цепи. Роль катода играет слой с *n*-проводимостью, роль анода - *p*-слой (дырочная проводимость).

При соединении в одном монокристалле полупроводников *p*- и *n*-типа возникает диффузионный поток электронов из полупроводника *n*-типа в полупроводник *p*-типа и, наоборот, поток дырок из *p*- в *n*-полупроводник. В результате такого процесса прилегающая к *p*-*n* переходу часть полупроводника *p*-типа будет заряжаться отрицательно, а прилегающая к *p*-*n* переходу часть полупроводника *n*-типа, наоборот, приобретет положительный заряд. Таким образом, вблизи *p*-*n* перехода образуется двойной заряженный слой, который противодействует процессу диффузии электронов и дырок. Действительно, диффузия стремится создать поток электронов из *n*-области в *p*-область, а поле заряженного слоя, наоборот, – вернуть электроны в *n*-область. Аналогичным образом поле в *p*-*n* переходе противодействует диффузии дырок из *p*-области в *n*-область. В результате устанавливается равновесное состояние. Таким образом, при отсутствии света *в области p-n перехода возникает потенциальный барьер, для преодоления которого электроны из n-полупроводника и дырки из p-полупроводника должны затратить определенную энергию.*

При поглощении света в полупроводнике возбуждаются электронно-дырочные пары. Для разделения носителей тока и появления фотоэлектродвижущей силы (фотоЭДС) должна существовать дополнительная сила. Наиболее эффективное разделение неравновесных носителей имеет место именно в области *p-n* перехода. Генерированные вблизи *p-n* перехода «неосновные» носители (дырки в *n*-полупроводнике и электроны в *p*-полупроводнике) диффундируют к *p-n* переходу, подхватываются полем *p-n перехода* и выбрасываются в полупроводник, в котором они становятся основными носителями: электроны будут локализоваться в полупроводнике *n*-типа, а дырки – в полупроводнике *p*-типа.



1 - Алюминиевая подложка (подложка электрод); 2 – кремниевый p-слой; 3 – n-слой; 4 – защитное антибликовое стекло; 5 – отрицательный электрод.

Рисунок 2.2 - Строение фотоэлемента

В результате полупроводник *p*-типа получает избыточный положительный заряд, а полупроводник *n*-типа – отрицательный. Между *n*- и *p*-областями фотоэлемента возникает разность потенциалов – *фотоЭДС, или напряжение в режиме холостого хода*. 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 – накопления носителей тока под действием света и их оттока из-за понижения высоты потенциального барьера* – при разной интенсивности света устанавливается разная величина фотоЭДС. При этом величина фотоЭДС растет пропорционально логарифму интенсивности свет, достигая насыщения при больших освещённостях.

При коротком замыкании освещенного *p-n* перехода в электрической цепи потечет ток, пропорциональный по величине интенсивности освещения и количеству генерированных светом электронно-дырочных пар. При включении в электрическую цепь полезной нагрузки, величина тока в цепи несколько уменьшится. Обычно электрическое сопротивление полезной нагрузки в цепи солнечного элемента *выбирают таким, чтобы получить максимальную отдаваемую этой нагрузке электрическую мощность.*

Лекция №3. Режимы работы и характеристики фотоэлементов. Термодинамическое преобразование солнечной энергии в электрическую

Содержание лекции: режимы работы фотоэлемента и его вольт-амперная и нагрузочная характеристики, термодинамическое преобразование солнечной энергии в электрическую, солнечные электростанции.

Цель лекции: изучить устройства и характеристики фотоэлементов, а также солнечных электростанции на основе термодинамического преобразования

Режимы работы, вольт-амперная и нагрузочная характеристики фотоэлемента. Поток генерированных светом носителей образует фототок $I_ф$. Величина $I_ф$ равна числу фотогенерированных носителей, прошедших через *p*–*n*-переход в единицу времени:

$$I_ф = g\frac{P_u}{h\nu}, \tag{3.1}$$

где q – величина заряда электрона;

P_u – мощность поглощенного монохроматического излучения;

$h\nu$ – энергия фотона.

Здесь предполагается, что в полупроводнике каждый поглощенный фотон с энергией E_g создает одну электронно-дырочную пару. Это условие хорошо выполняется для солнечных элементов на основе Si.

При нулевых внутренних омических потерях в солнечном элементе *режим короткого замыкания* эквивалентен нулевому напряжению смещения *p*-*n*-перехода, поэтому ток короткого замыкания $I_{кз}$ равен фототоку: $I_{кз} = I_ф$.

При разомкнутой внешней цепи *p*–*n*-перехода (*режим холостого хода*) фотоэлектроны, попадая в *n*-область, накапливаются в ней и заряжают n-область отрицательно. Остающиеся в *p*-области избыточные дырки заряжают *p*-область положительно. Возникающая таким образом разность потенциалов является напряжением холостого хода $U_{x.x.}$. Полярность $U_{x.x.}$ соответствует прямому смещению *p*–*n*-перехода.

В режиме холостого хода фототок уравновешивается «темновым» током I_m. Абсолютное значение «темнового» тока:

$$I_m = I_0 exp\left[\left(\frac{gU_{xx}}{AkT}\right) - 1\right] = I_ф, \tag{3.2}$$

откуда при $I_ф » I_0$:

$$U_{xx} = \frac{AkT}{g} ln\left(\frac{I_ф}{I_0} + 1\right) \approx \frac{AkT}{g} ln\frac{I_ф}{I_0}, \quad (3.3)$$

где k – постоянная Больцмана, $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $0{,}86 \cdot 10^{-4}$ эВ/К;

T – аб-солютная температура, К;

I_0 – ток насыщения;

A – параметр вольт-амперной характеристики *p*-*n*-перехода, меняющийся для разных отрезков графика от 1 до 2 по следующему закону:

$$A = 0{,}434 \frac{g}{kT} \Delta U, \quad (3.4)$$

где ΔU – приращение напряжения при приращении плотности тока (или абсолютного значения тока) по касательной на один порядок.

«Темновой» ток сопровождается рекомбинацией неосновных носителей тока (в данном случае – электронов в *p*-области). При актах рекомбинации потенциальная энергия электронно-дырочных пар выделяется либо посредством излучения фотонов с $h\nu \approx E_g$, либо расходуется на нагревание кристаллической решетки.

Таким образом, режим холостого хода солнечного элемента эквивалентен режиму работы светодиодов, а также выпрямительных диодов в пропускном направлении.

При положительном напряжении смещения фототок $I_ф$ вычитается из «темнового» тока *p*–*n*-перехода, а при отрицательном – суммируется с ним. Выражение для вольт-амперной характеристики записывается в виде:

$$I = I_0 \left[exp\left(\frac{gU}{AkT}\right) - 1\right] - I_ф. \quad (3.5)$$

Рассмотрим подключение к *p*–*n*-переходу варьируемого сопротивления нагрузки. Направление тока в нагрузке всегда совпадает с направлением $I_ф$, а сам ток нагрузки $I_н$ равен результирующему току через *p*–*n*-переход. Принимая направление тока $I_ф$ за положительное, для $I_н$ можно записать:

$$I_н = I_ф - I_0 \left[exp\left(\frac{gU}{AkT}\right) - 1\right], \quad (3.6)$$

где $U_н$ – напряжение на нагрузке, равное напряжению на *p*–*n*-переходе.

Последнее выражение описывает *нагрузочную вольт-амперную характеристику освещенного p–n-перехода.*

При известных параметрах нагрузочной вольт-амперной характеристики и заданном значении $R_н$ величины $I_н$ и $U_н$ находятся

методом последовательных приближений (рисунок 3.1).

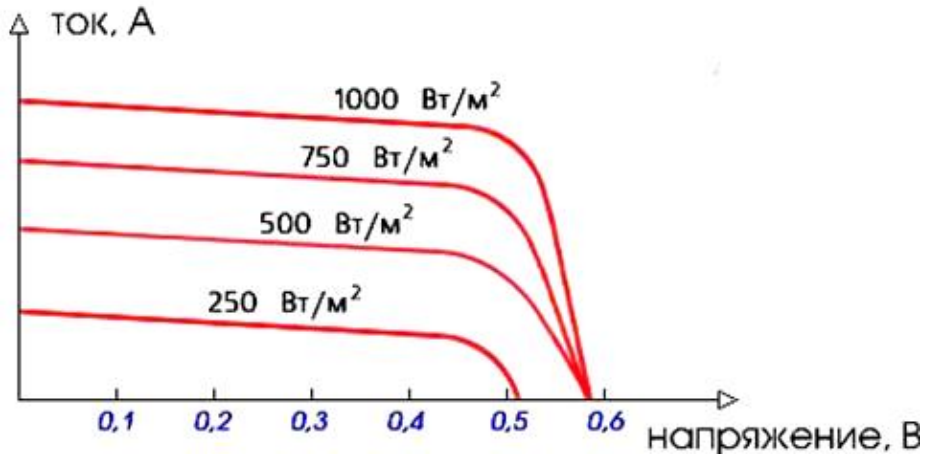


Рисунок 3.1 – Вольт-амперные характеристики элемента (ВАХ) при различных мощностях светового потока

Освещенный *p–n*-переход может быть представлен в виде *эквивалентной схемы*, где источник тока имитирует генерацию постоянного фототока, не зависящего от напряжения *p–n*-перехода, а диод представляет собой неосвещенный *p–n*-переход (рисунок 3.2). При варьировании R_H фототок перераспределяется между нагрузкой и *p–n*-переходом.

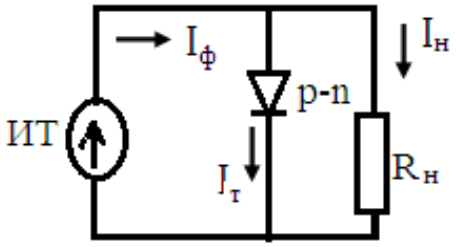


Рисунок 3.2 - Эквивалентная электрическая схема фотоэлемента

Электрическая мощность, выделяемая в нагрузке:

$$P = I_н U_н = I_ф U_н - I_ф U_н exp\left(\frac{g U_н}{AkT}\right). \quad (3.7)$$

В режимах короткого замыкания и холостого хода P=0, поскольку либо I_H, либо U_H равны нулю.

Последовательно соединенные элементы являются источником постоянного тока. Несколько объединенных фотоэлектрических преобразователей представляют собой солнечную батарею. Соединённые последовательно и параллельно ячейки образуют модули, содержащие,

например, 36 ячеек. В свою очередь модули собираются в панели мощностью от нескольких ватт до сотен киловатт. Они вырабатывают постоянный ток, подаваемый на зарядку аккумуляторной батареи, а затем через инвертор переменный ток стандартного качества идёт потребителям.

Основные электрические параметры солнечного элемента. Напряжение холостого хода, генерируемое одним элементом, зависит от размеров элемента. Величина тока зависит от интенсивности света и так же от размера элемента, под которым понимают его освещаемая поверхность.

Нагрузочная характеристика фотоэлемента показана на рисунке 3.3. *Пиковая (максимальная) мощность солнечного элемента соответствует напряжению около 0,47 В.* Таким образом, чтобы правильно оценить качество солнечного элемента, необходимо нагрузить его так, чтобы выходное напряжение равнялось 0,47 В.

Электрические параметры для отдельного солнечного элемента представляются в виде вольт-амперной характеристики при стандартных условиях (Standart Test Conditions). Стандартными условиями работы элементов являются: освещенность 1000 Вт/м^2; температура 25^{o}С; спектр АМ 1,5 (солнечный спектр на широте 45^o).

При использовании ФЭС для бытовых целей, зарядки аккумуляторных батарей (АКБ) с номинальным напряжением 12 В 36 солнечных элементов соединяются последовательно и герметизируются посредством ламинации на стекле, текстолите, алюминии.

Напряжение фотоэлемента, соответствующее максимальной мощности, называется *напряжением максимальной мощности (рабочим напряжением - U_p)*, а соответствующий ток - *током максимальной мощности (рабочим током - I_p)* (рисунок 3.3). Рабочее напряжение для модуля, состоящего из 36 элементов, будет около 16…17 В (0,45….0,47 В на элемент) при 25^{o}С.

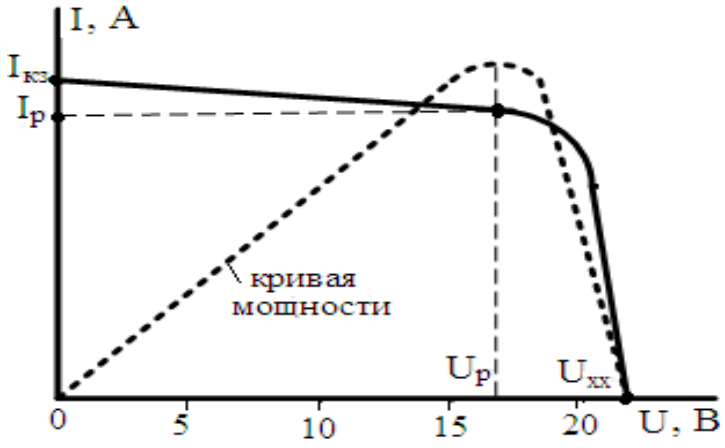


Рисунок 3.3 - Нагрузочная характеристика фотоэлемента

Важным показателем работы солнечных элементов является их *температурный режим. Длинноволновое инфракрасное излучение не производит фототока, а только разогревает полупроводник.* При нагреве

элемента на один градус свыше 25°С он теряет в напряжении 0,002 вольт, т.е. 0,4 %/ °С, а в яркий солнечный день элементы нагреваются до 60-70 °С, теряя 0,07-0,09 вольт каждый. Для поддержания КПД солнечных преобразователей на расчетном уровне применяется водяное или воздушное охлаждение элементов. Обычно КПД солнечного элемента колеблется в пределах 10-18 %. Солнечная ячейка размером 100×100 мм при стандартных условиях может генерировать 1-1,6 Вт.

Следует повторить, *что напряжение холостого хода модуля мало зависит от освещенности*, в то время *как рабочий ток, прямо пропорционален освещенности.* Модуль мощностью P_w в течение выбранного периода выработает следующее количество энергии:

$$W = k\, P_w\, E\, /\, 1000, \qquad (3.8)$$

где Е - значение инсоляции (поступившей лучистой энергии) за выбранный период;

k – коэффициент, равный 0,5 летом и 0,7 в зимний период на потерю мощности солнечных элементов при нагреве на солнце, а также учитывающий изменение угла падения лучей на поверхность модулей в течение дня.

Способы увеличения КПД солнечных электростанции. Для увеличения КПД солнечных электростанций применяют системы автоматического слежения за солнцем (трэкеры). Наибольшей эффективности работы фотоэлектрических панелей можно добиться только при их установке перпендикулярно падающим солнечным лучам. Угол наклона солнца относительно горизонта меняется как в течение суток так и в течение года.

Такие установки дороги и сложны в установке, поэтому их применение оправдано только при большом количестве панелей. Ещё одним эффективным способом является применение концентраторов солнечного излучения.

Но увеличение плотности энергии поступающей на фотопанель приводит к необходимости использования систем охлаждения, что делает конструкцию более сложной.

Выпадения осадков в виде дождя, снега, пыли и града сокращают количество вырабатываемой энергии, создают опасность поломки активных элементов ФЭС. Это требует постоянной *очистки поверхности фотоэлектрических панелей.*

Применение фотоэлектрических систем. При использовании ФЭС может быть обеспечен энергией автономный потребитель или произведена электроэнергия в распределительные сети.

Полупроводниковые ФЭС впервые использовались в таких уникальных системах, где стоимость их не имела значения (искусственные спутники Земли, космические станции и многие другие объекты).

В настоящее время фотоэнергетика находится на крутом подъеме, сильно возросло производство ФИЭ в США, Франции, Китае, Германии,

Японии. В США начато строительство супермощной солнечной электростанции, занимающей площадь 11449 квадратных миль, способной покрыть большую часть потребности Соединенных Штатов в электроэнергии.

Доля солнечной энергии в общем объёме пиковой энергии к 2015 году достигнет 15 – 20 %. Несмотря на то, что в настоящее время стоимость электричества, производимого фотоэнергетическими системами в 1.5-2 раза выше (20-40 цент/кВт·ч.), чем традиционного (10-20 цент/кВт·ч.), объем этого рынка уже превысил 3,5 млрд долл. По прогнозам, начиная с 2040 года, доля возобновляемой энергетики станет преобладающей в общей мировой энергетике. Цена на фотоэлектрическую систему неуклонно падает и в последние 10 лет снижается с темпом 4% в год. В мире резко увеличивается интерес к фотоэнергетике особенно в развивающихся странах.

Пиковая мощность ФЭС в Ольмедилья-де-Аларкон (Испания, 2008 г.) составил 60 МВт. Пиковая мощность ФЭС Пуэртояно в Испании равна 50 МВт и считается одной из крупнейших в мире (рисунок 3.4).

Большое распространение фотовольтаика получила для энергообеспечения автономных объектов, ферм, сельских больниц в комбинации с ветроэнергетическими установками в виде комплексных энергетических систем (рисунок 3.5).

Термодинамическое преобразование солнечной энергии в электрическую. Термодинамическое преобразование солнечной энергии разделяется на два вида: с использованием станций *башенного* и *модульного типа*. В обоих этих типах *солнечная энергия преобразуется в тепловую энергию пара, и в дальнейшем с использованием парогенератора происходит преобразование в электрическую.*

Солнечные электростанции (СЭС) состоит из следующих основных элементов: оптическая система (гелиостаты); паровые котлы (теплоаккумуляторы); паровая турбина с электрогенератором; система автоматического управления. Гелиостаты имеют различные формы: параболоцилиндрические концентраторы; параболические концентраторы; линза Френеля; система плоских зеркал.

Башенная СЭС Solar-1 (Барстоу, Америка) имеет мощность 10 МВт, площадь зеркал -73,2 тыс.м^2, 1818 гелиостатов, высота парового котла -14 м, диаметр -7,2 м, температура пара 560-1482 ^{0}С (рисунок 3.6).

Расположенная во Франции *башенная СЭС THEMIS* имеет мощность 2,5 МВт, площадь зеркал -108 тыс. м^2, 201 гелиостатов, высота башни - 80 м, температура теплопринимающей поверхности 505 ^{0}С, КПД 16%.

Башенная СЭС Eurelios **(**Сицилия**)** имеет мощность 1 МВт, площадь зеркал -35 тыс. м^2, 182 гелиостатов, высота башни - 35 м, , температура теплопринимающей поверхности 512 ^{0}С, КПД 16% (рисунок 3.7).

В Крыму действует башенная СЭС: мощность 5 МВт, высота -70 м, 1600 гелиостатов, температура пара - 250 ^{0}С, давление пара - 4 МПа.

В Израиле работает *модульная СЭС*, которая состоит из 560 модулей, каждый модуль имеет длину 5,2 м, апертуру 2,57 м^2 (рисунок 3.8).

Модульные СЭС с параболическими концентраторами построены в США, Франции, Италии, Японии, Австрии, мощность которых находится в пределах от несколько МВТ до 13,8МВт (рисунок 3.9).

Рисунок 3.4–Электростанция Puertollano (Пуэртояно), 50 МВт

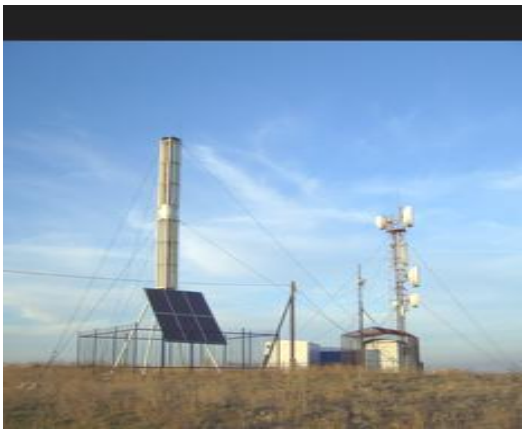


Рисунок 3.5 - Комплексные энергетические системы ВРТБ

Рисунок 3.6 - Башенная СЭС Solar-1

Рисунок 3.7 - Башенная СЭС Eurelios

Рисунок 3.8 - Модульная СЭС с параболоцилиндрическими концентраторами

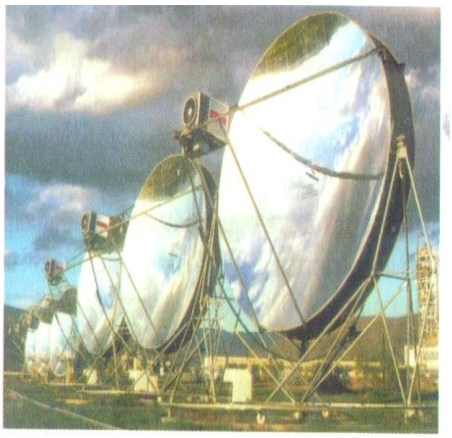


Рисунок 3.9 - Модульная СЭС с параболическими концентраторами

Лекция №4. Использование солнца как источника тепловой энергии. Плоские солнечные коллекторы

Содержание лекции: классификация и основные элементы систем солнечного теплоснабжения, классификация и принцип работы солнечных коллекторов, плоские солнечные коллекторы.

Цель лекции: изучение устройства и принцип работы систем солнечного теплоснабжения и конструкций плоских коллекторов.

*Классификация и основные элементы с*истем солнечного теплоснабжения. *Системами солнечного теплоснабжения* называются системы, использующие в качестве источника тепловой энергии солнечную радиацию. Их характерным отличием от других систем низкотемпературного отопления является применение специального элемента – гелиоприемника, предназначенного для улавливания солнечной радиации и преобразования ее в тепловую энергию.

По способу использования солнечной радиации системы солнечного низкотемпературного отопления подразделяют *на пассивные и активные*.

Пассивными называются системы солнечного отопления, в которых в качестве элемента, воспринимающего солнечную радиацию и преобразующего ее в теплоту, *служат само здание или его отдельные ограждения (здание-коллектор, стена-коллектор, кровля-коллектор и т. п.*

Активными называются системы солнечного низкотемпературного отопления, в которых *гелиоприемник является самостоятельным отдельным устройством*, не относящимся к зданию.

Активные гелиосистемы могут быть подразделены:

- *по назначению* (системы горячего водоснабжения, отопления, комбинированные системы для целей теплохолодоснабжения);
- *по виду используемого теплоносителя* (жидкостные и воздушные);
- *по продолжительности работы* (круглогодичные, сезонные);
- по техническому решению схем (одно-, двух-, многоконтурные).

Воздух является широко распространенным незамерзающим во всем диапазоне рабочих параметров теплоносителем. При применении его в качестве теплоносителя возможно совмещение систем отопления с системой вентиляции. Однако воздух – малотеплоемкий теплоноситель, что ведет к увеличению расхода металла на устройство систем воздушного отопления по сравнению с водяными системами.

Вода является теплоемким и широкодоступным теплоносителем. Однако при температурах ниже 0°С в нее необходимо добавлять незамерзающие жидкости. Кроме того, нужно учитывать, что вода, насыщенная кислородом, вызывает коррозию трубопроводов и аппаратов. Но расход металла в водяных гелиосистемах значительно ниже, что в большой степени способствует более широкому их применению.

Сезонные гелиосистемы горячего водоснабжения обычно одноконтурные и функционируют в летние и переходные месяцы, в периоды с положительной температурой наружного воздуха. Они могут иметь дополнительный источник теплоты или обходиться без него в зависимости от назначения обслуживаемого объекта и условий эксплуатации.

Гелиосистемы отопления (круглогодичные) зданий обычно двухконтурные или чаще всего многоконтурные, причем для разных контуров могут быть применены различные теплоносители (например, в гелиоконтуре – водные растворы незамерзающих жидкостей, в промежуточных контурах – вода, а в контуре потребителя – воздух).

Комбинированные гелиосистемы круглогодичного действия для целей теплохолодоснабжения зданий многоконтурны и включают дополнительный источник теплоты в виде традиционного теплогенератора.

Одноконтурные установки – наиболее распространенный вид гелиоустановок. Конструкция одноконтурной гелиоустановки с естественной циркуляцией показана на рисунке 4.1. Установка укомплектована гелиоколлекторами и баком-аккумулятором.

Достоинства: простота, высокий КПД. *Недостатки***:** невозможность работы при отрицательных температурах (сезонность), коррозия из-за наличия растворенного кислорода в воде, высокие требования к качеству воды.

Двухконтурная гелиоустановка с естественной циркуляцией состоит из двух контуров. Первый контур состоит из: солнечного коллектора, бака накопителя горячей воды, теплообменника, установленного в баке, расширительного бачка первичного контура и воздухоотводчика. Второй контур состоит из бака накопителя горячей воды (аккумулятора) и трубопроводов холодной и горячей воды, запорно-регулирующей арматуры.

Достоинства установки - модульный принцип позволяет применить естественную циркуляцию теплоносителя первичного контура, возможность работы в зимнее время благодаря использованию антифриза, повышение надежности работы и срока службы. *Недостатки***:** необходимость теплообменника, дополнительные потери, необходимость периодически замены теплоносителя в первичном контуре.

Двухконтурная гелиоустановка с принудительной циркуляцией аналогично предыдущей, но первичный контур дополнительно снабжен с насосной станцией, щитом управления, терморегуляторами, манометром, предохранительным клапаном и регулирующей арматурой (рисунок 4.2).

Данная установка имеет следующие *достоинства:*

- благодаря принудительной циркуляции теплоносителя на 30% улучшается теплосъем с гелиоколлекторов;
- возможность установки бака-аккумулятора в любом удобном месте;
- возможность работы в оптимальном режиме и легкость управления;

Недостатки: необходимость использования насосов и дополнительный расход электроэнергии на работу насоса.

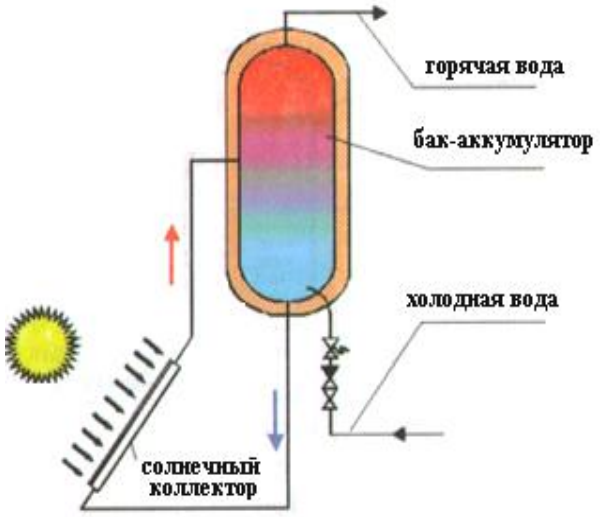


Рисунок 4.1 - Конструкция одноконтурной гелиоустановки с естественной циркуляцией

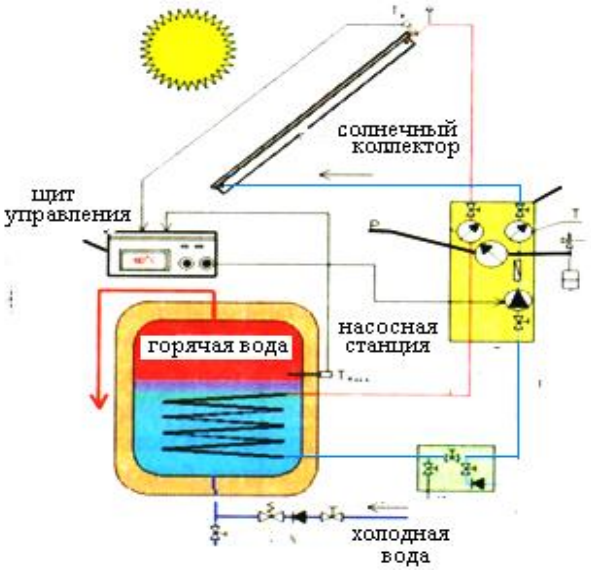
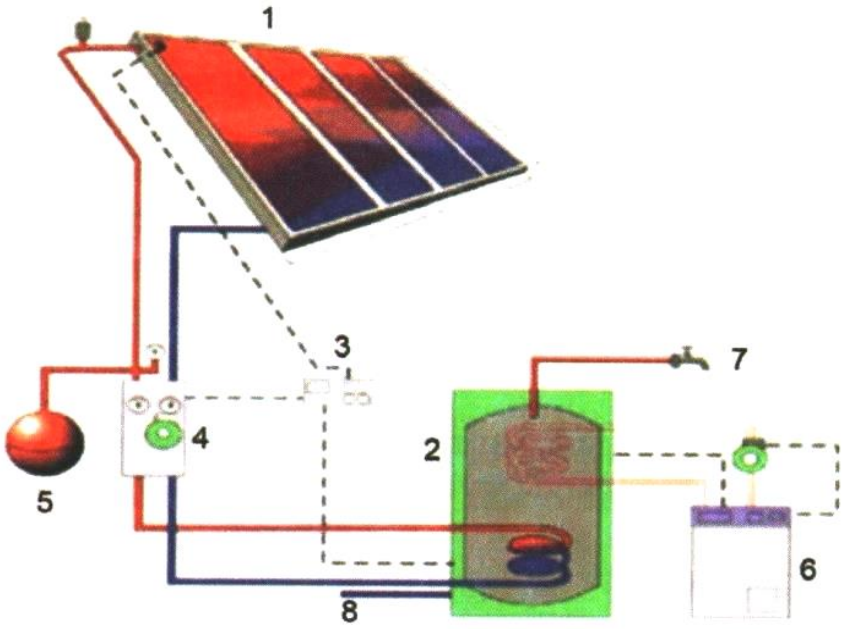


Рисунок 4.2 - Конструкция двухконтурной гелиоустановки с принудительной циркуляцией

Многоконтурными бывают комбинированные гелиоустановки, дополнительно снабженные теплогенераторами, работающими на органическом топливе или электроэнергии и включаемые в работу в пасмурные или холодные дни, когда гелиоколлекторы не обеспечивают достаточным количеством тепла системы ГВС или отопления (рисунок 4.3).



1 – гелиоколлектор; 2- аккумулятор; 3- щит управления; 4 – насосная станция; 5 – расширительный бачок; 6 – дополнительный источник теплоты; 7 – выход горячей воды ; 8- вход горячей воды.

Рисунок 4.3 - Многоконтурная комбинированная установка

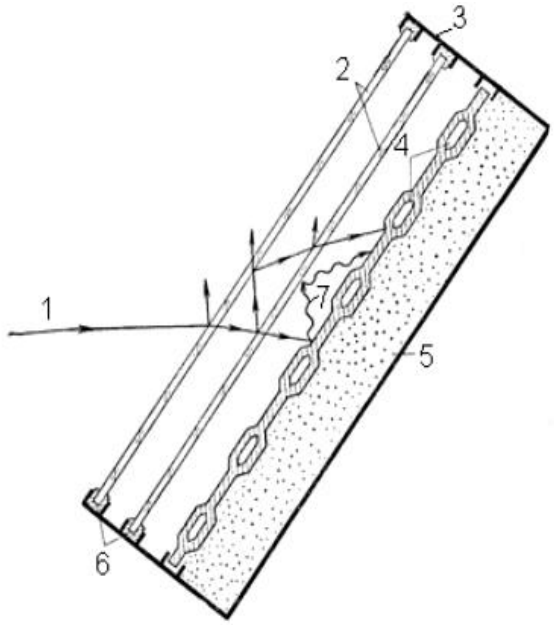
Классификация и конструкция солнечных коллекторов. По принципу исполнения гелиоколлекторы разделяются на два типа: *низкопотенциальные и высокопотенциальные, соответственно.*

По конструкции различают: *плоские* коллекторы, коллекторы *с фокусирующими концентраторами, вакуумные* коллекторы.

Плоские гелиоколлекторы (ПК) поглощают, как прямое, так и рассеянное излучение, и является предпочтительными при нагреве теплоносителя до температур ниже 100 °С, *а концентрирующие коллектора* представляют собой оптическую систему усиливающего излучение, и теплоноситель в них нагревается до высоких температур.

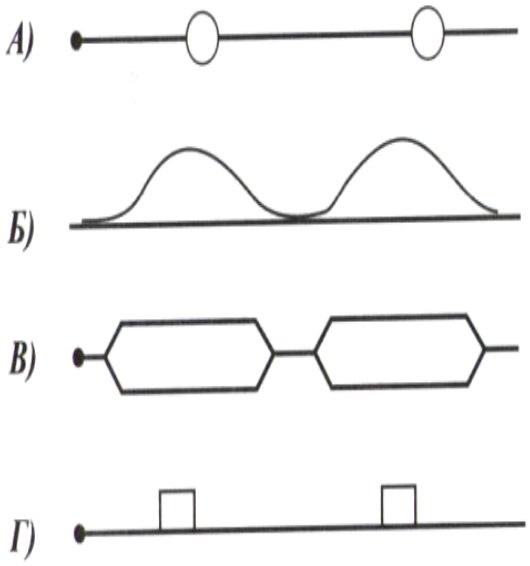
Плоский солнечный коллектор – устройство с поглощающей панелью плоской конфигурации и плоской прозрачной изоляцией для поглощения энергии солнечного излучения и преобразования ее в тепловую. Они состоят из стеклянного или пластикового покрытия (одинарного, двойного, тройного), тепловоспринимающей панели, окрашенной со стороны, обращенной к солнцу, в черный цвет, изоляции на обратной стороне и корпуса (рисунок 4.4). Изготавливаются тепловоспринимающие панели с каналами для теплоносителя из алюминия или стали двух типов: лист-труба и штампованные панели (труба в листе).

На рисунке 4.5 показаны различные конструкций поглощающих панелей.



1 – солнечные лучи; 2 – остекление; 3 – корпус; 4 – тепловоспринимающая поверхность; 5 – теплоизоляция; 6 – уплотнитель; 7 – длинноволновое излучение тепловоспринимающей пластины.

Рисунок 4.4 – Плоский солнечный коллектор



А) – лист- труба; Б) – гофрированная поверхность с каналами; В) – штампованная поверхность с каналами; Г) – поверхность с прямоугольными каналами.

Рисунок 4.5 - Схемы различных конструкций поглощающих панелей

В ПК выявлены следующие типы конструкции поглощающих панелей:

– панельные, которые делятся на трубчатые, лист-труба, лист;

– емкостные соответственно спиральные, «подушка»;

– с теплопроводной средой;

– вакуумированные;

– коллекторы с тепловыми трубами.

Пластмассовые панели из-за недолговечности и быстрого старения под действием солнечных лучей, а также из-за малой теплопроводности не находят широкого применения.

Под действием солнечной радиации тепловоспринимающие панели разогреваются до температур 70-80°С, превышающих температуру окружающей среды, что ведет к возрастанию конвективной теплоотдачи панели в окружающую среду и ее собственного излучения на небосвод. Для достижения более высоких температур теплоносителя поверхность пластины покрывают *спектрально-селективными слоями*, активно поглощающими коротковолновое излучение солнца и снижающими ее собственное тепловое излучение в длинноволновой части спектра. Такие конструкции на основе «черного никеля», «черного хрома», окиси меди на алюминии, окиси меди на меди и другие дорогостоящи.

Другим способом улучшения характеристик ПК является *создание вакуума между тепловоспринимающей панелью и прозрачной изоляцией* для уменьшения тепловых потерь.

Достоинством плоских коллекторов является способность поглощать прямого и рассеянного излучения и простота конструкций.

Гелиоколлекторы с концентраторами делятся на следующие конструкции:

– *зеркальные и диффузные*, обусловливающие отражатели различной конфигурации, в которую входят *эвольвентные, параболоидные; спиральные, параболоцилиндрические;*

– *цилиндрические линзы Френеля и сферические линзы Френеля;*

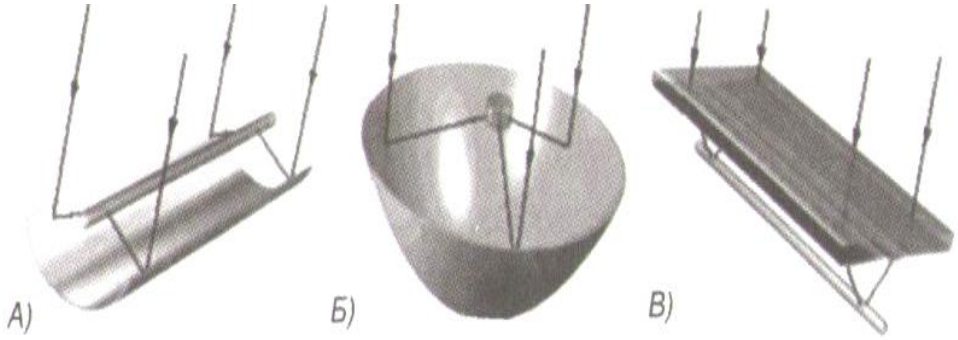
В фокусирующих ГК между источником и приемником излучения установлено *оптическое устройство-концентратор*, благодаря чему увеличивается плотность лучистого потока, падающего на приемник, по сравнению с плоским коллектором, равным по площади выходу в оптическое устройство. Численное значение этого увеличения называют *степенью концентрации.*

Фокусирующие системы подразделяются на *параболоиды* (высокая концентрация, температура рабочая 250-650°С, КПД 60-70%); *параболоцилиндры* и *плоские пластины* (низкая концентрация, рабочая температура 60-140°С, КПД 30-50%). На рисунке 4.6 показаны различные конструкций гелиоколлекторов с концентраторами.

Параболоцилиндрический концентраторы обеспечивают концентрацию солнечных лучей на одной линии, характеризуются средней концентрацией,

температура рабочая 150-400°С, КПД 50-70% (рисунок 4.6, поз. А). Снабжены системой слежения за солнцем.

Параболический концентратор управляется по двум координатам. Он сконцентрирует солнечные лучи на небольшую площадь, характеризуется высокой концентрацией, температура рабочая 250-650°С, КПД 60-70% (рисунок 4.6, поз. Б).



А) – параболоцилиндрический концентратор; Б) - параболический концентратор; В) – концентратор на основе плоской линзы Френеля.

Рисунок 4.6 - Конструкция различных концентраторов

Линза Френеля изготавливается из цельного стекла и имеет поперечное сечение специальной формы (рисунок 4.6, поз. В).

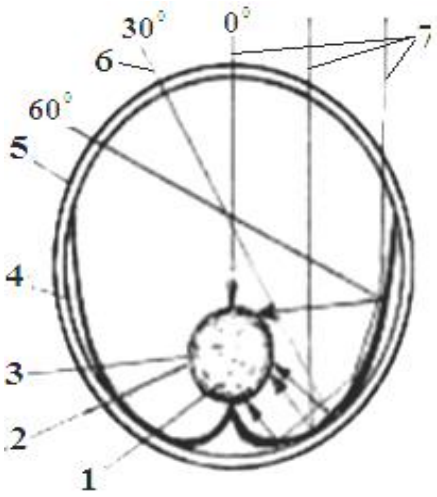
На рисунке 4.7 дан разрез гелиоколлектора фирмы ″Corning″ с тепловой трубой и желобчатым зеркалом. Некоторые отличительные черты желобчатого зеркала заключаются в следующем: касательные с поверхности поглотителя перпендикулярны зеркалу; поверхность поглотителя равна углу раствора, а концентрация С=1.

Концентраторы с диффузными отражателями различной формы, обеспечивают более низкие оптические КПД. Их можно изготовить окрашиванием металлического листа белой краской, относительно более долговечны и требуют значительно меньше затрат на материалы и изготовление по сравнению с зеркальными отражателями.

На рисунке 4.8 показан ГК, состоящий из профилей, изогнутых в виде спирали. Попадая в спираль, прямая радиация, отражаясь, попадает вовнутрь спирали и поглощается круглой трубой

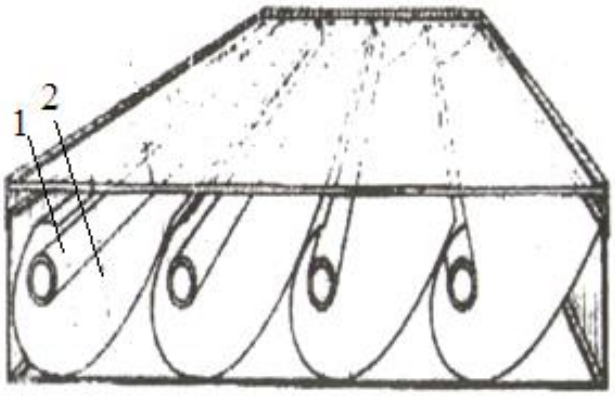
Достоинства гелиоколлекторов с концентраторами: возможность получения тепла (пара) высокой температуры;

Недостатки: высокая стоимость, необходимость очистки от пыли, работа в светлое время суток, необходимость аккумулятора большого объема и системы слежения за солнцем, расход электроэнергии на работу системы слежения.



1-пар; 2-приемник лучей с селективным покрытием; 3-пористый фитиль; 4-желобчатое зеркало; 5-трубчатый стеклянный кожух; 6-угол раствора; 7-солнечные лучи.

Рисунок 4.7 – Разрез коллектора с желобчатым зеркалом



1- труба коллектора;
2- отражающая поверхность.

Рисунок 4.8 - Солнечный коллектор с отражателем, изогнутым по спирали

Лекция №5. Трубчатые вакуумированные солнечные коллекторы. Основные параметры солнечных коллекторов

Содержание лекции: трубчатые вакуумированные коллекторы, их виды, конструкции и принципы работы; основные параметры гелиоколлекторов.

Цель лекции: изучение устройства и принципов работы трубчатых вакуумированных коллекторов, а также основных параметров гелиоколекторов.

Трубчатые вакуумированные коллекторы. Они имеют значительно меньшие тепловые потери в окружающую среду, поскольку вакуум является идеальным теплоизолятором. Однако достаточно сложно сделать вакуум и удержать его в солнечном коллекторе со временем эксплуатации.

Коллекторы с вакуумной тепловой изоляцией обыкновенно изготавливают из цилиндрических трубок. Они обеспечивают, по сравнению с плоскими коллекторами, более высокую эффективность преобразования солнечной энергии и температурные уровни, что позволяет нагреть теплоноситель до температуры порядка 80…100°С.

Трубчатая форма в виде колбы наиболее оптимальна для создания и удержания вакуума. Именно поэтому наибольшее распространение в бытовом секторе получили вакуумные трубчатые коллекторы.

Наиболее распространенные *солнечные вакуумные трубчатые коллекторы* можно классифицировать:

- *по типу стеклянной трубки* (*коаксиальная, перьевая*);

- *по типу теплового канала* (*тепловая трубка «Heat pipe», прямоточная*).

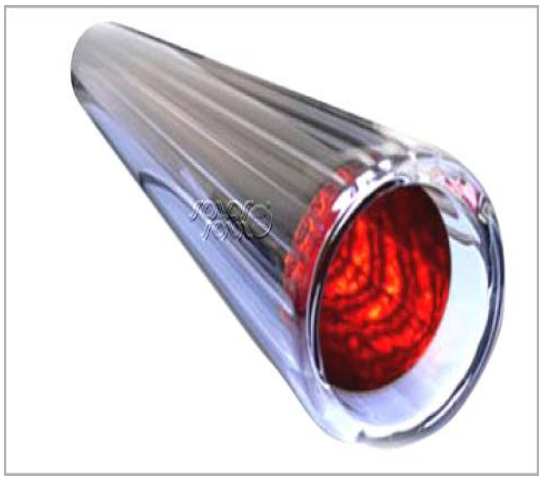
Существует два основных типа конструкции стеклянной трубки: *коаксиальная трубка и перьевая трубка*.

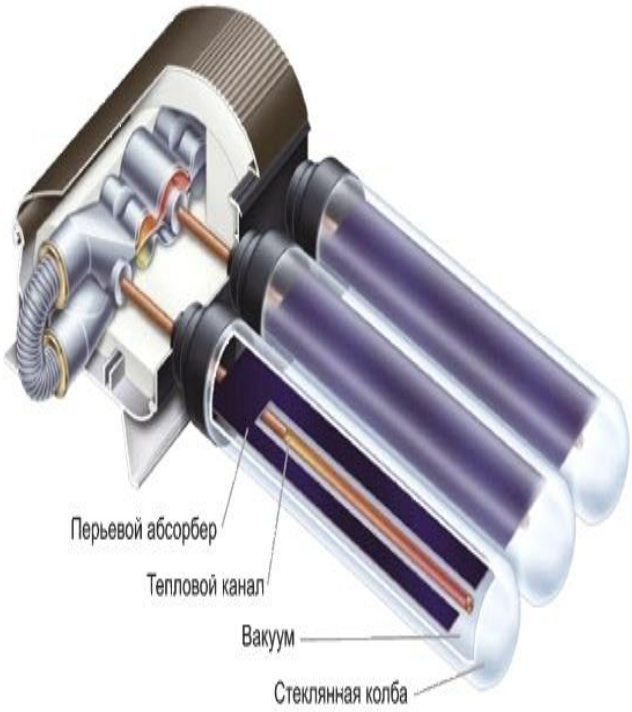
Коаксиальная трубка в соответствии с рисунком 5.1,а фактически является термосом, представляет собой двойную стеклянную колбу, в пространстве между трубками откачан воздух (создан вакуум). На стенке внутренней трубки нанесено поглощающее покрытие, поэтому передача тепла происходит от самой стеклянной колбы.

Перьевая трубка в соответствии с рисунком 5.1,б представляет собой одностенную стеклянную колбу. Вакуум в данной трубке находится в пространстве теплового канала, где часть теплового канала и абсорбера интегрирована внутри самой колбы.

По типу теплового канала солнечные вакуумные трубчатые коллекторы можно разделить на два типа*: тепловой канал типа «Heat pipe» и прямоточный тепловой канал.*

Солнечный вакуумный коллектор *с трубкой типа «Heat pipe*» так же известны под названием *тепловая труба*, занимает большую часть рынка солнечных коллекторов (рисунок 5.2). Принцип работы тепловой трубки основан на том, что в закрытых трубках из теплопроводящего металла (меди или алюминия) находится легкоиспаряющаяся жидкость, перенос тепла происходит за счёт того, что жидкость нагреваясь под действием





а) б)

Рисунок 5.1 - Вакуумная коаксиальная колба (а) и перьевая трубка (б)

солнечного излучения, испаряется на нижней части трубки, поглощая теплоту испарения и конденсируется в верхней части (теплосборнике), а затем снова перетекает вниз и процесс повторяется. Теплоноситель через поглотитель отбирает выделяемое тепло.

В коллекторах с прямоточным каналом (рисунок 5.3) теплоноситель непосредственно протекает и нагревается в каждой из трубок коллектора.

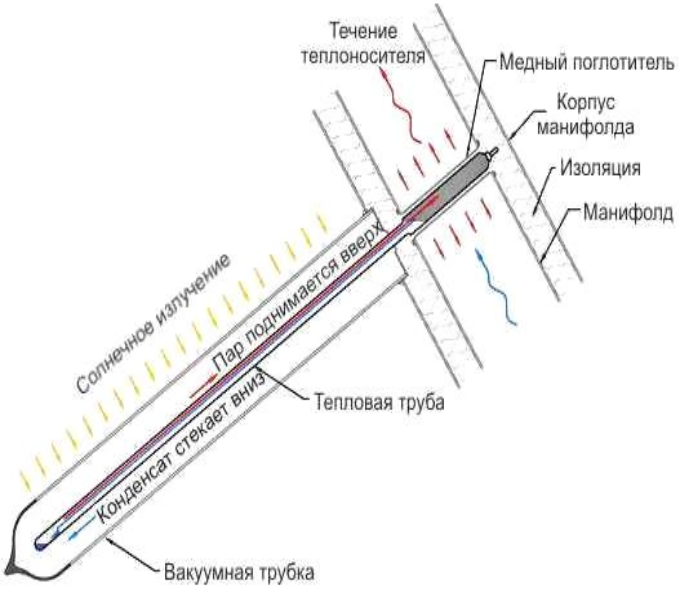


Рисунок 5.2 - Схема работы тепловой трубки в вакуумном коллекторе

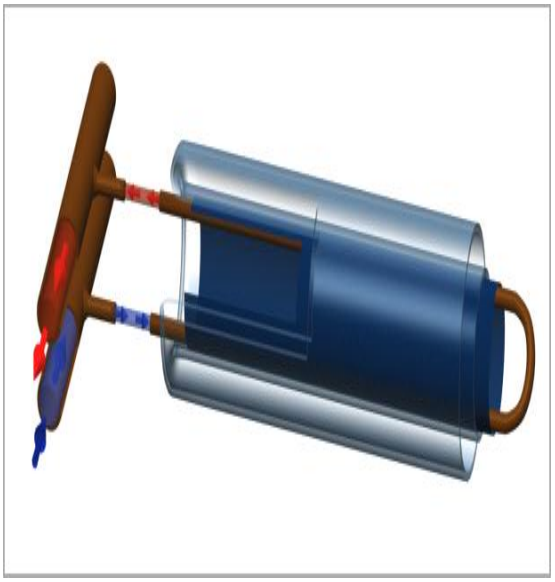


Рисунок 5.3 - Коллектор с прямоточным тепловым каналом

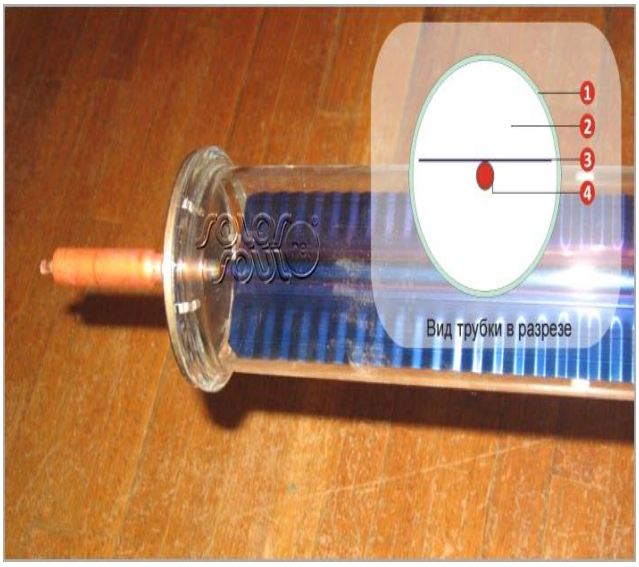
В соответствии с рисунком 5.2 вакуумная коаксиальная трубка может сочетаться с тепловым каналом типа «Heat pipe». Данный солнечный вакуумный коллектор является наиболее распространенным ввиду своей дешевизны и простоты замены поврежденных трубок. Эти коллекторы имеет довольно сложный процесс передачи тепла. Тепло передается несколько раз, от стекла к алюминиевому оребрению, а затем от алюминия к самой тепловой трубке и только потом передается теплоносителю гелиосистемы. Поэтому в сочетании с круглой формой абсорбирующей поверхности эффективность солнечного коллектора этого типа невысока. Показатели максимального КПД (оптического КПД «η_0») коллектора до 65%.

Коаксиальная вакуумная трубка так же может быть использована для коллектора с прямоточным тепловым каналом. Данный тип коллектора получил название коллектор с «U»-образной трубкой.

В данных типах коллекторов, за счет уменьшения количества теплопередач (теплота от алюминиевого слоя передается сразу трубкам, в которых циркулирует теплоноситель гелиосистемы), максимальный КПД может составлять для некоторых моделей до 76%. Недостатком может

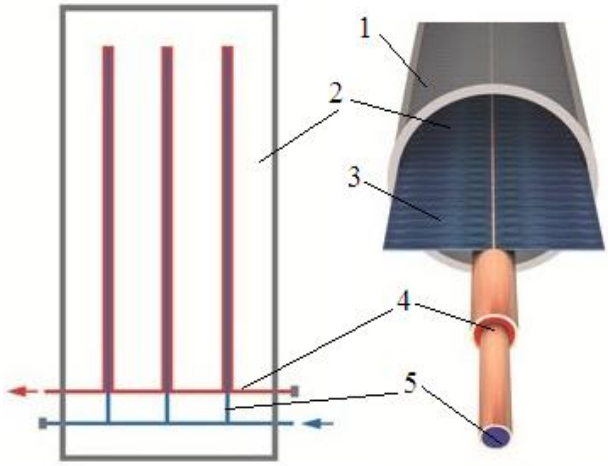
являться то, что при определенном характере повреждения замены может потребовать весь солнечный коллектор, а не только колба.

В соответствии с рисунком 5.4 перьевая трубка может сочетаться с тепловым каналом «Heat pipe».



1-стеклянная колба; 2-вакуумная прослойка; 3-медный абсорбер с высокоселективным покрытием; 4 -тепловой канал с легкоиспаряющейся жидкостью.

Рисунок 5.4 - Перьевая трубка с тепловым каналом типа «Heat pipe»



1-стеклянная колба; 2 – вакуумная прослойка; 3-медный абсорбер с высокоселективным покрытием; 4-внутренний тепловой канал с теплоносителем; 5-наружный тепловой канал с теплоносителем.

Рисунок 5.5 - Перьевая трубка с прямоточным тепловым каналом

Данные солнечные вакуумные трубчатые коллекторы имеют более высокие оптические характеристики, чем коллекторы с коаксиальной трубкой. У некоторых производителей значение максимального КПД достигают 77%. Этому способствуют некоторые конструктивные особенности: плоский абсорбер с непосредственной передачей теплоты к тепловой трубке, а так же один слой стекла, что значительно уменьшает отражение солнечного излучения. Так же удобным является процесс замены поврежденных трубок, не требующий замены всего коллектора и сливания теплоносителя всей гелиосистемы.

Наиболее эффективным сочетанием является перьевая трубка и прямоточный тепловой канал (рисунок 5.5). Такой *солнечный вакуумный коллектор* имеет максимальный КПД до 80%. При замене поврежденных трубок требуется сливать теплоноситель всей гелиосистемы. Так же эти коллекторы обладают довольно высокой ценой.

На рисунке 5.6 показан общий вид гелиоколлектора из ваууумированных колб с тепловой трубкой, а на рисунке 5.7 – гелиоустановка с баком-аккумулятором и коллектором, имеющем перьевые трубки с прямоточным тепловым каналом.

Рисунок 5.6- Гелиоколлектор из вауумированных колб с тепловой трубкой

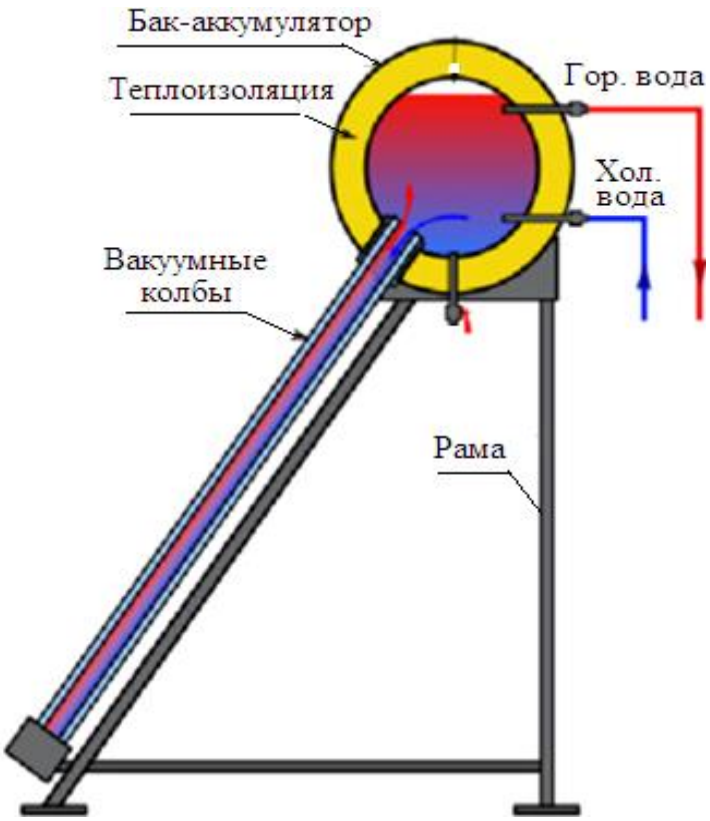


Рисунок 5.7 – Гелиоустановка

Основные параметры гелиоколлекторов. Для выявления тенденции развития конструкции коллекторов необходимы сопоставление и тщательный анализ следующих характеристик: *конструктивных параметров; теплоэнергетических параметров; оценку материала каждого элемента коллектора; технологичность изготовления коллекторов.*

К конструктивным параметрам относятся: габаритная площадь; удельная масса (на единицу габаритной площади); отношение рабочей площади к габаритной; удельный объем каналов поглощающей панели.

Габаритная площадь зарубежных конструкций находится в диапазоне от 1 до 6 м^2, однако площади от 1,5 до 2,5 м^2 имеют до 53% коллекторов. Следует учесть, что при малой габаритной площади единичного коллектора заметно возрастает удельная (на 1 м^2 площадь) стоимость. При слишком больших габаритах и массе появляются существенные трудности при перевозке коллекторов и их монтаже. В США наиболее часто встречаются с габаритной площадью менее 2,0…2,5 м^2 (24% случаев), а коллекторы с габаритной площадью менее 1,0 м^2 почти не выпускаются. Габаритная максимальная площадь единичного коллектора составляет около 5,0 м^2. В Западной Европе большинство конструкций коллекторов имеют площадь от 1 до 2,5 м^2 (около 70%), а в России - от 0,8 до 1,5 м^2.

Удельная масса зарубежных конструкций находится в диапазоне 10 до 40 кг/м^2, наиболее распространенная удельная масса от 15 до 25 кг/м^2, которая составляет до 70 %. В основном это коллекторы с прозрачной изоляцией и поглощающим элементом, выполненным либо целиком из меди, либо из медных трубок и алюминиевого листа. Удельная масса незаполненного коллектора в США находится в пределах от 26 до 35 кг/м^2. В Западной Европе до 90% СК имеют удельную массу от 20 до 30 кг/м^2, а в России от 20 до 50 кг/м^2 (коллектор НПП «Конкурент» - 23 кг/м^2).

Отношение площади тепловоспринимающей поверхности к габаритному площади солнечного коллектора или, другими словами, *коэффициент заполнения* $К_з$, служит качественной характеристикой конструкции коллектора. При низком значении коэффициента заполнения коллектор имеет хорошую боковую изоляцию, однако его габаритная площадь неоправданно завышена по отношению к площади тепловоспринимающей поверхности. При значениях $К_з$, близких или равных единице, мала толщина боковой изоляции, или она вообще отсутствует, что повышает потери через боковые грани. Почти у 80% модификации солнечных коллекторов США коэффициент заполнения находится в диапазоне 0,88…0,96. Самое низкое значение коэффициента заполнения равно 0,83, а самое высокое –1,0. Последнее значение $К_з$ соответствует солнечным коллекторам без боковой и прозрачной изоляции, предназначенным для подогрева воды в плавательных бассейнах. Коэффициент заполнения охватывает диапазон от 0,81 до 0,99, у 50 % коллекторов имеют $К_з$ 0,9…0,96, а российских коллекторов $К_з$ - до 0,9.

Важнейшим параметром, характеризующим конструкцию поглощающей панели, является *удельный объем каналов теплоносителя*. Дело в том, что чем меньше объем жидкости в солнечном коллекторе, тем меньше его тепловая инерция. При этом коллектор быстрее входит в рабочий режим, увеличивается скорость теплоносителя в каналах, что повышает коэффициент теплоотдачи от стенки канала к жидкости.

Удельный объем каналов у зарубежных конструкций лежит в диапазоне от 0,37 до 4,37 л/м^2, однако 80 % имеют 0,37 до 2,37 л/м^2. У российских коллекторов удельный объем каналов 0,37 до 5,37 л/м^2.

Основным узлом солнечного коллектора является *поглощающая панель* – котел. Коллектор с котлом «труба в листе» *изготавливается из медных труб и медных пластин*. Медные трубы диаметром 9-15 мм и 20-28 мм припаиваются к медному листу толщиной 0,45 мм. Расстояние между осями соседних труб рекомендуется принимать равным 100-150 мм. В Великобритании в настоящее время рекомендуется использовать несколько более толстые медные листы толщиной 0,56-0,91 мм.

Важнейшим показателем качества солнечного коллектора является его *теплоэнергетические параметры*. Согласно ГОСТу 28310-89 «Солнечные коллекторы» таковыми являются:

- *произведение коэффициента эффективности поглощающей панели* (F_R) *и оптического КПД коллектора* ($\eta_0 = \tau\alpha$), *т.е.* $F_R \cdot \tau\alpha$, где τ -

пропускательная способность прозрачной изоляции; α - поглощательная способность панели;

- *произведение коэффициента эффективности поглощающей панели F_R и полного коэффициента тепловых потерь U_L, т.е.* $F_R \cdot U_L$ (*Вт/(м^2·К)*.

Эти параметры определяются экспериментально при испытаниях солнечных коллекторов. Результаты аппроксимируется уравнением

$$\eta = F_R \cdot \tau\alpha - F_R U_L T^*, \qquad (5.1)$$

где η – КПД коллектора;

T^* – приведенная температура, равная $\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)$.

Для солнечных коллекторов США с селективным поглощающим покрытием значения $F_R \cdot U_L$ лежат в диапазоне от 3,3 до 5,3 Вт/(м^2·°С), а для коллекторов без прозрачной изоляции - в диапазоне от 10 до 23 Вт/ (м^2·°С). Значения $F_R \cdot U_L$ для западноевропейских коллекторов лежит в пределах от 4,3 до 9,3 Вт/ (м^2·°С) с некоторым максимумом от 6,3 до 7,3 Вт/ (м^2·°С).

Значение $F_R \cdot (\tau\alpha)$ у 90 % коллекторов США это значение лежит в диапазоне 0,66…0,81 с максимумом в диапазоне 0,71…0,76. У западноевропейских коллекторов – в пределах 0,71…0,81.

КПД солнечного коллектора (η) выражает отношение (полезной) тепловой энергии, отведенной от абсорбера с помощью циркулирующего через коллектор теплоносителя, к падающей на абсорбер суммарной лучистой энергии. *Оптический КПД (η_0)* определяет, какой процент излучения, через прозрачное покрытие попадает на коллектор и поглощается абсорбером.

КПД современных коллекторов выражают формулой:

$$\eta = \eta_0 - k_1 \cdot \frac{\Delta T}{E_g} - k_2 \cdot \frac{\Delta T^2}{E_g}, \qquad (5.2)$$

где E_g – плотность суммарного падающего на коллектор солнечного излучения, Вт/м^2;

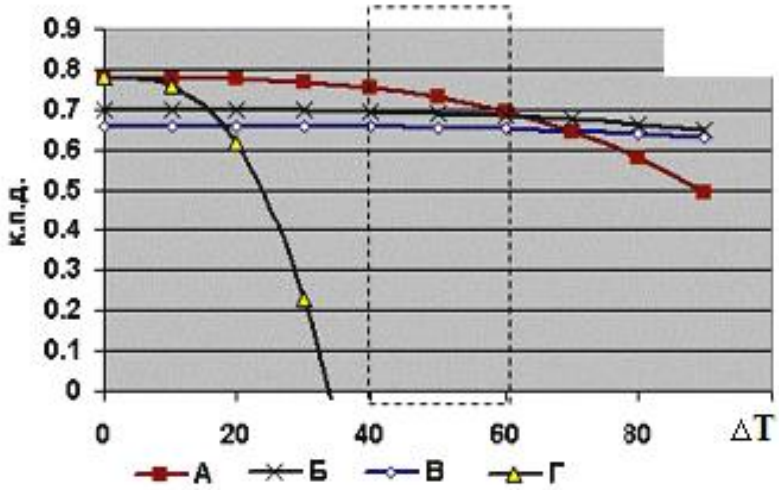
ΔT – разность между средней температурой теплоносителя в коллекторе и температурой окружающей среды;

η_0 – КПД коллектора при ΔT = 0°С, значения коэффициентов k_1 и k_2 зависят от конструкции коллектора.

На рисунке 5.8 показано, как соотносятся к.п.д коллекторов А, Б, В и Г. Наиболее распространены плоские коллекторы, имеющие однослойное остекление (тип А) из-за дешевизны при приемлемой производительности. В зимнее время (или в северных широтах) становится заметным преимущество *вакуумных коллекторов (типы Б, В)*.

Для повышения эффективности работы гелиоустановки должен быть

оптимизирован угол наклона коллектора. Оптимальный угол наклона к горизонту плоского коллектора, ориентированного в южном направлении и используемого *летом, равна: S =Ψ–15°, для зимнего периода -S.=Ψ +15°, круглогодичного периода - S.= Ψ,* где Ψ – географическая широта местности.



А- плоские коллекторы, имеющие однослойное остекление ($к_1$=3.56, $к_2$=0.0146, η_0= 0.779;

Б - вакуумные трубчатые ($к_1$=1.33, $к_2$=0.0071, η_0= 0.7);

В - вакуумные трубчатые с рефлекторами ($к_1$=0.82, $к_2$=0.0064, η_0= 0.661);

Г - плоские пластиковые коллекторы ($к_1$=27.35, $к_2$=0.1, η_0= 0.78).

Рисунок 5.8 - Сравнение к.п.д. коллекторов при инсоляции E_g=705 Вт/м^2

Лекция №6. Ветроэнергетика. Общая характеристика и перспективы использования энергии ветра. Работа ветрового колеса. Идеальный ветряк

Содержание лекции: происхождение, основные свойства ветра и его виды, классификация силы ветра по шкале Бофорта, перспективы использования энергии ветра и национальная Программа развития ветроэнергетики в РК, энергия ветра и работа ветрового колеса крыльчатого ветродвигателя, идеальный ветряк и его характеристики, мощность пропеллерного ветроколеса.

Цель лекции: изучение ветра как источника энергии и перспективы использования ветровой энергии в мире и РК, а также принципа работы ветрового колеса.

Общая характеристика ветра. Основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание солнцем земной поверхности. Земная поверхность неоднородна: суша, океаны, горы, леса обусловливают различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений. Все эти причины осложняют общую циркуляцию атмосферы.

На экваторе у земной поверхности лежит зона затишья со слабыми

переменными ветрами. На север и на юг от зоны затишья расположены зоны пассатов, которые вследствие вращения Земли с запада на восток имеют отклонение к западу. Таким образом, в северном полушарии постоянные ветры приходят с северо-востока, в южном – с юго-востока, как показано на рисунке 6.1.

В характеристике ветра входят *числовая величина скорости и направление*, откуда дует ветер. Скорость ветра выражается в м/с, км/ч, узлах и условных единицах (баллах). Для обозначения направления указывают *румб* – направление относительно сторон света, либо угол, который образует горизонтальный вектор скорости с меридианом. Север принимается за 360° или 0°, восток за 90°, юг – за 180°, запад за 270°. В Метеорологии принято разделять окружность горизонта на 16 румбов, 1 румб соответствует 22,5° (рисунок 6.2). Главными называют направления на север (С), юг (Ю), запад (З), восток (В). Названия 12 других Румбов являются комбинациями названий главных румбов, например, северо-восток (СВ); северо-северо-восток (ССВ), юго-юго-запад (ЮЮЗ).

По территориальному принципу можно выделить глобальные и местные ветры. К глобальным ветрам относятся пассаты и западный ветер.

Пассаты простираются примерно до 30° северной и южной широт и отличаются равномерностью воздушных течений по направлению и скорости. Средняя скорость юго-восточных пассатов северного полушария у поверхности земли достигает 6…8 м/с. Эти ветры вблизи больших континентов нарушаются сильными годовыми колебаниями температуры и

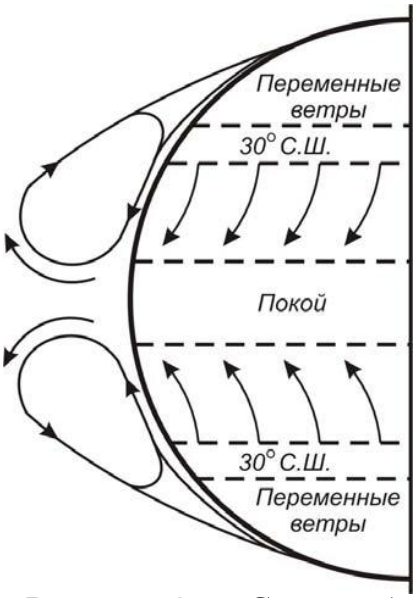


Рисунок 6.1 - Схема общей циркуляции земной атмосферы

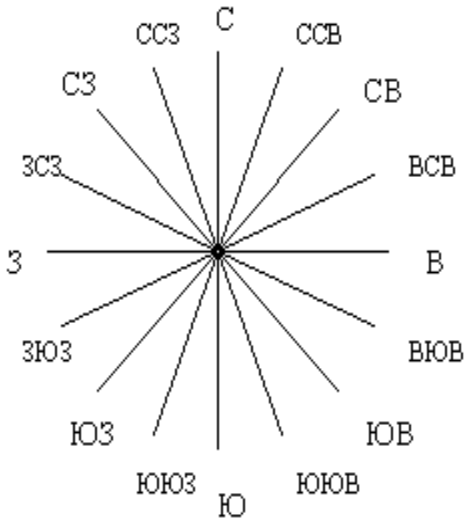


Рисунок 6.2 - 1 – 16 румбов

давления над материками. Высота слоя пассатов простирается от 1 до 4 км.

Выше над ними находится слой переменных ветров, а над этим слоем находится зона антипассатов, дующих в направлении, противоположном

направлению пассатов. Высота слоя антипассатов меняется от 4 до 8 км в зависимости от времени года и от места.

Местные ветры. Местные ветры возникают под влиянием особых местных условий рельефа земной поверхности (моря, горы и т. п.).

Бризы. Вследствие изменения температур днём и ночью возникают береговые морские ветры, которые называются бризами. Зона распространения бриза около 40 км в сторону моря и 40 км – в сторону суши. Высота распространения бризов в наших широтах достигает от 200 до 300 м.

Муссоны. Годовые изменения температуры в береговых районах больших морей и океанов также вызывают циркуляцию, аналогичную бризам, но с годовым периодом. Эта циркуляция, более крупного размера, чем бризы, называется муссонами.

Сила ветра оценивается по 12-баллной шкале Бофорта. Ветер *со скоростью порядка 3,6-5,8 м/с* считается *слабым***,** и при этих скоростях тихоходные ВЭУ начинают вращаться Ветер *со скоростью порядка 5,8- 8,5* м/с считается *умеренным*, является хорошим условием для работы ВЭУ. При скоростях ветра *8,5-14 м/с* ВЭУ работают в расчетном диапазоне и достигают предельно допустимого режима при скорости 17 м/с. Ветер со скоростью выше 14 м/с считается сильным, выше 20 – 25 м/с – штормовым, а выше 30 – 35 м/с – ураганом.

Сильные колебания режима ветра, обусловленные турбулентностью, отмечается особо как порывистость или шквальность.

Порывистость ветра – наличие в потоке значительных колебаний по скорости и направлению с интервалами в несколько десятков секунд.

Шквальность – резкое усиление и ослабление ветра в течение короткого времени, сопровождающегося также изменениями его направления, продолжительностью в несколько минут или десятков минут.

Перспективы использования энергии ветра. Использование энергии воздушных потоков - древнейшая мечта человечества – то обретает реальность в виде паруса и ветряных мельниц для получения механической энергии, то замирает при изобретении тепловых и гидравлических двигателей и централизованной выработки электроэнергии на электростанциях, затем возникает вновь, когда тепловая энергетика стала угрожать всему живому.

Для выработки электроэнергии ветер используется с 10 – 20 годов XX века. С 70 – х годов прошлого столетия ветроэнергетика начала расти, к XXI столетию приобрела заметное развитие, продолжает интенсивно развиваться. Интерес к ветроэнергетике объясняется следующими факторами:

- неисчерпаемый ресурс энергии, не зависящий от цен на топливо;
- отсутствие выбросов вредных веществ и парниковых газов;
- развитый мировой рынок ветроэнергетических установок;
- конкурентная цена электроэнергии, не зависящая от цены топлива;
- короткие сроки строительства ВЭС с адаптацией мощности ВЭС к требуемой нагрузке и местным климатическим условиям;
- возможность децентрализованного обеспечения электроэнергией

потребителей отдаленных районов.

Высокие темпы развития ветроэнергетики характерны для Германии 1990-х годов. Особого внимания заслуживает опыт фирмы «Enercon», которая освоила гамму ВЭУ мощностью 30, 130, 600, 1500 кВт в одном агрегате, выполненных с трехлопастными стеклопластиковыми ветроколесами, имеющими диаметр от 12 до 66 м.

В настоящее время промышленным производством ВЭУ в мире занимается более 300 фирм. Развитую промышленность имеют Дания, США, Германия, США. Установленная мощность ветроэнергетики в мире в 2009 г достигла 159'213 МВт, ветроэнергетика вырабатывала 340 ТВтч электроэнергии, что соответствует 2 % от глобального электропотребления. Доля ветроэнергетики в электроснабжении составляет: в Дании - 20%; в Португалии- 15%; в Испании -14%; в Германии - 9%.

Ветроэнергетика выступает как источник энергии, помогающий странам решать вопросы энергетической безопасности и экологии.

В Казахстане разработана Национальная Программа развития ветроэнергетики**.** Порядка 10% территории Казахстана имеет среднегодовую скорость ветра 6м/с и выше, что предопределяет хорошие перспективы для развития ветроэнергетики. Ветровой потенциал энергии Казахстана составляет около 1820 млрд. кВтч в год и распространен на значительной территории страны. Первоочередными для строительства ВЭС могут рассматриваться площадки в Джунгарских воротах и Шелекском Коридоре, расположенные в энергодефицитной Алматинской области.

Энергия ветра. При взаимодействии потока с лопастью возникают:

- сила сопротивления, параллельная вектору относительной скорости набегающего потока;
- подъемная сила, перпендикулярная силе сопротивления;
- завихрение обтекающего лопасти потока;
- турбулизация потока, т. е. хаотические возмущения его скорости по величине и направлению;
- препятствие для набегающего потока.

Поток ветра с поперечным сечением F обладает кинетической энергией, определяемой выражением $mV^2/2$.

Масса m воздуха, протекающая через поперечное сечение F со скоростью V, равна: $m = \rho FV$. Тогда кинетическая энергия ветра:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{\rho FV^3}{2}. \qquad (6.1)$$

Из (6.1) следует, *что энергия ветра изменяется пропорционально кубу его скорости.*

Посмотрим, сколько процентов энергии ветра может превратить в полезную работу поверхность F, поставленная перпендикулярно к направлению ветра и перемещающаяся в этом же направлении, что имеет

место, например, у ветродвигателей карусельного типа (рисунок 6.3).

Мощность T определяется произведением силы P на скорость V: $T=P\,V$.

Воздушный поток вследствие торможения его поверхностью получит подпор и будет обтекать её и производить давление силой P_X. Вследствие действия этой силы поверхность F будет перемещаться в направлении потока с некоторой скоростью U (рисунок 6.1); *работа* T при этом будет равна произведению силы на скорость U, с которой перемещается поверхность F, то есть:

$$T = P_x U = P_x = C_x F \frac{\rho}{2}(V-U)^2 U\,, \qquad (6.2)$$

где P_X – сила сопротивления;

C_X – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления;

F – поверхность миделевого сечения тела, т. е. проекции площади тела на плоскость, перпендикулярную направлению потока.

В этом случае ветер набегает на поверхность *с относительной скоростью, равной:* $W = V - U$. Определим *отношение работы*, развиваемой движущейся поверхностью и выраженной уравнением (6.2), к энергии ветрового потока, имеющего поперечное сечение, равное этой поверхности,

$$\xi = \frac{C_x F \frac{\rho}{2}(V-U)^2 U}{F\frac{\rho}{2}V^3} = C_x (V-U)^2 \frac{U}{V} = C_x\left(1-\frac{U}{V}\right)^2 \frac{U}{V}. \qquad (6.3)$$

Величину ξ называют *коэффициентом использования энергии ветра,* зависит от скорости перемещения поверхности в направлении ветра. При некотором значении скорости U коэффициент ξ получает максимальное значение. Значение скорости U заключено в пределах между $U = 0$ и $U = V$. Установлено, чтобы получить максимальное ξ поверхность должна перемещаться со скоростью: $U=V/3$. *М*аксимальный коэффициент использования энергии ветра при работе поверхности силой сопротивления не может быть больше $\xi = 0{,}192$.

Работа ветрового колеса крыльчатого ветродвигателя. Крыльчатые ветроколеса работают за счёт косого удара при движении лопастей перпендикулярно к направлению скорости ветра в противоположность к прямому удару, рассмотренному в предыдущем случае. Устройство такого колеса показано на рисунке 6.4.

На горизонтальном валу закреплены крылья, число которых у современных ветродвигателей бывает от двух и больше. Крыло ветроколеса состоит из маха *а* и лопасти *б*, закрепляемой на махе так, что она образует с плоскостью вращения некоторый угол φ. Этот угол называют *углом*

заклинения лопасти (рисунок 6.4).

При этом на её элементы набегает воздушный поток с относительной скоростью *W* под углом α , который называют *углом атаки*, и действует с силой *R*. Углы φ и α в значительной мере определяют эффективность крыльев.

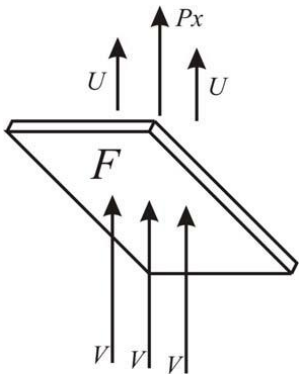


Рисунок 6.3 - Действие силы ветра на поверхность

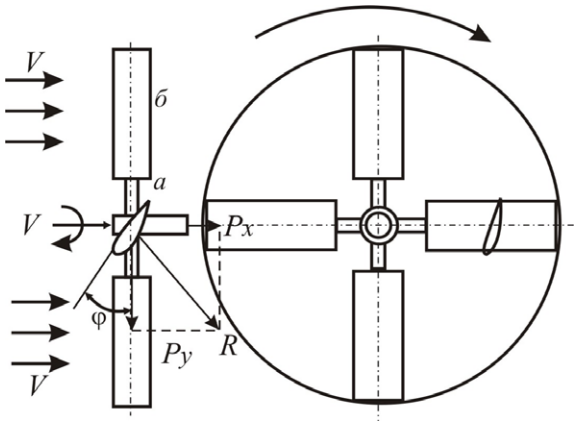
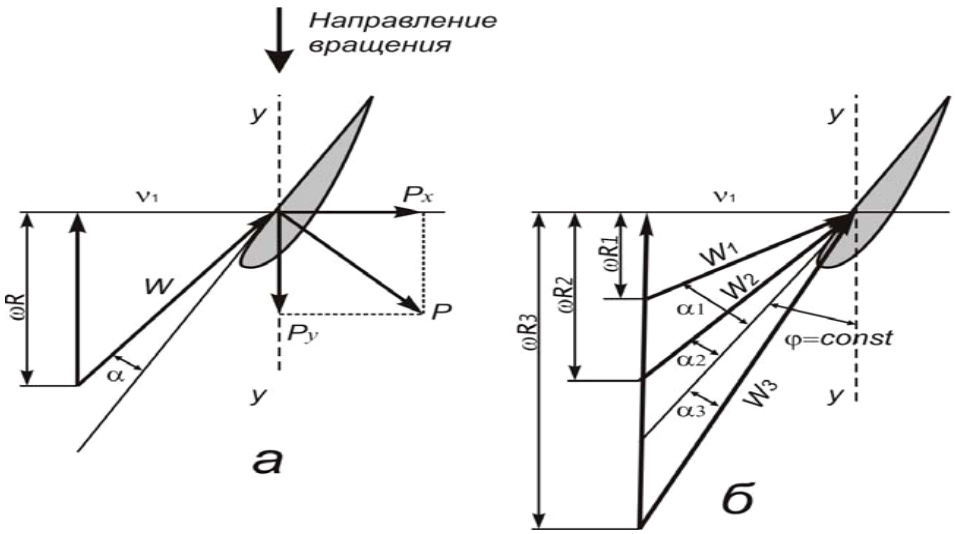


Рисунок 6.4 - Конструктивная схема крыльчатого ветроколеса

Силу *R* раскладывают на силы P_X и P_Y (рисунок 6.5**).** *Силы* P_X производят давление в направлении ветра, которое называется *лобовым давлением.* Силы P_Y действуют в плоскости у – у вращения ветроколеса и создают крутящий момент.

Максимальные силы, приводящие колесо во вращение, получаются при некотором значении угла атаки α, т. е. угла наклона относительного потока к поверхности лопасти. Ввиду того что окружная скорость по длине крыла не



а – схема действия сил воздушного потока на элемент лопасти;
б – графическое изображение относительного потока, набегающего на элементы лопасти, расположенные на разных радиусах ветроколеса.

Рисунок 6.5 - Схема действия сил воздушного потока на лопасти

одинакова, а возрастает по мере удаления его элементов от оси вращения ветроколеса, относительная скорость W набегания потока на лопасть также возрастает. Вместе с этим убывает угол атаки α, и при некоторой окружной скорости ωR, где ω – угловая скорость, этот угол станет отрицательным (рисунок 6.3,*б*). Следовательно, не все элементы крыла будут иметь максимальную подъёмную силу.

Если мы будем уменьшать угол φ каждого элемента лопасти по мере удаления его от оси вращения так, чтобы наивыгоднейший угол атаки α сохранялся примерно постоянным, то мы получим условие, при котором приблизительно все элементы лопасти будут работать со своей максимальной подъёмной силой. Лопасть с переменным углом заклинения получает форму винтовой поверхности. Правильные углы заклинения лопасти при хорошем аэродинамическом качестве профиля, а также ширине, соответствующей заданной быстроходности, обеспечивают *высокий коэффициент использования энергии ветра*. У хороших моделей он достигает *46 %*.

Идеальным ветряком называют ветроколесо, у которого:

1) Ось вращения параллельна скорости ветра.
2) Бесконечно большое число лопастей очень малой ширины.
3) Профильное сопротивление крыльев равно нулю, и циркуляция вдоль лопасти постоянна.
4) Потерянная скорость воздушного потока на ветроколесе постоянна по всей сметаемой поверхности ветряка.
5) Угловая скорость стремится к бесконечности.

Представим равномерный поток ветра, набегающий на идеальное ветроколесо со скоростью V в сечении AA'' (рисунок 6.6). В сечении BB' на ветроколесе скорость будет $V_1 = V - v_1$, а на некотором расстоянии позади ветряка в сечении CC' скорость будет $V_2 = V - v_2$, где v_1, v_2 – потери скорости.

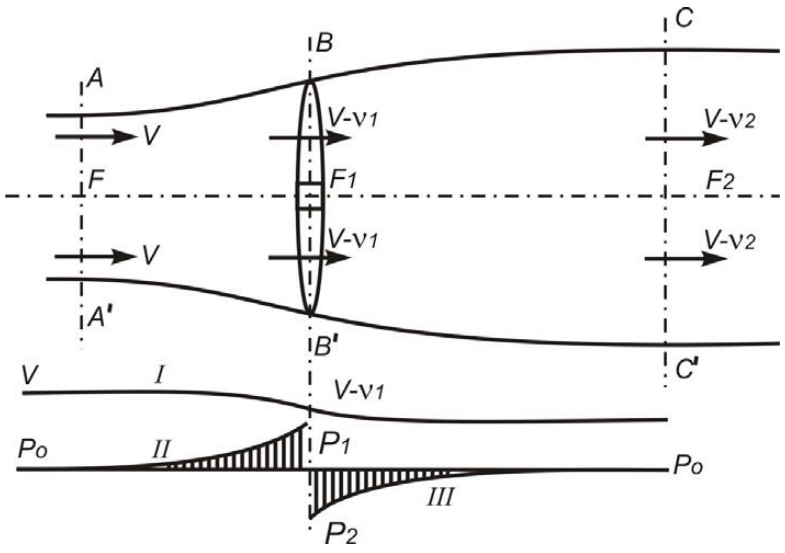


Рисунок 6.6 - Характеристика воздушного потока, протекающего через ветроколесо

Выражение $B = 2\frac{P}{\rho F V^2} = 4e(1-e)$ называют *коэффициентом нагрузки на ометаемую площадь* или *коэффициентом лобового давления*. Здесь $e=V_1/V$ - *коэффициент торможения.*

Коэффициент использования энергии ветра: $\xi = 4e(1-e)^2$. *Для идеального ветряка* он принимает максимальное значение $\xi = 0{,}593$, когда $e=1/3$, т.е. скорость ветра за ветроколесом в три раза меньше скорости ветра перед ветроколесом. При этом B=0,888.

Мощность N реального пропеллерного ветроколеса определяется:

$$N = 0{,}593\frac{1}{2Z}\rho F V^3 \cos V, \text{ Вт}, \qquad (6.4)$$

здесь 0,593 – коэффициент использования энергии ветра;

Z – коэффициент порывистости и частоты изменения направления;

F – площадь активной поверхности ветроколеса;

CosV – соответствие положения ветроколеса и установки лопастей направлению и скорости ветра.

Лекция №7. Ветроэнергетические установки

Цель лекции: изучение конструкций, принципов и режимов работы ветроэнергетических установок.

Содержание лекции: конструкции, принципы и режимы работы различных ветроэнергетических установок, их преимущества и недостатки, автономная работа ВЭУ и ее параллельная работа с энергосистемой.

Классификация ветроустановок по принципу работы. Принцип действия всех ветродвигателей один: под напором ветра вращается ветроколесо с лопастями, передавая крутящий момент через систему передач валу генератора, вырабатывающего электроэнергию, водяному насосу. Чем больше диаметр ветроколеса, тем больший воздушный поток оно захватывает и тем больше энергии вырабатывает агрегат. Существующие системы ветродвигателей *по схеме устройства ветроколеса и его положению в потоке ветра* разделяются *на три класса***.**

Первый класс включает ветродвигатели, у которых ветровое колесо располагается в вертикальной плоскости; при этом плоскость вращения перпендикулярна направлению ветра, и, следовательно, ось ветроколеса параллельна потоку. Такие ветродвигатели называются *крыльчатыми***.**

Быстроходностью называется отношение окружной скорости (ωR) конца лопасти к скорости ветра: $Z = \omega R/V$.

Крыльчатые ветродвигатели в зависимости от типа ветроколеса и

быстроходности разделяются на три группы (рисунок 7.1, поз. 1-4);

- ветродвигатели многолопастные, тихоходные, с $Z_n \leq 2$;

- ветродвигатели малолопастные, тихоходные, в том числе ветряные мельницы, с быстроходностью $Z_n > 2$;

- ветродвигатели малолопастные, быстроходные, $Z_n \geq 3$.

Ко *второму классу* относятся системы ветродвигателей *с вертикальной осью вращения ветрового колеса*. По конструктивной схеме они разбиваются на группы:

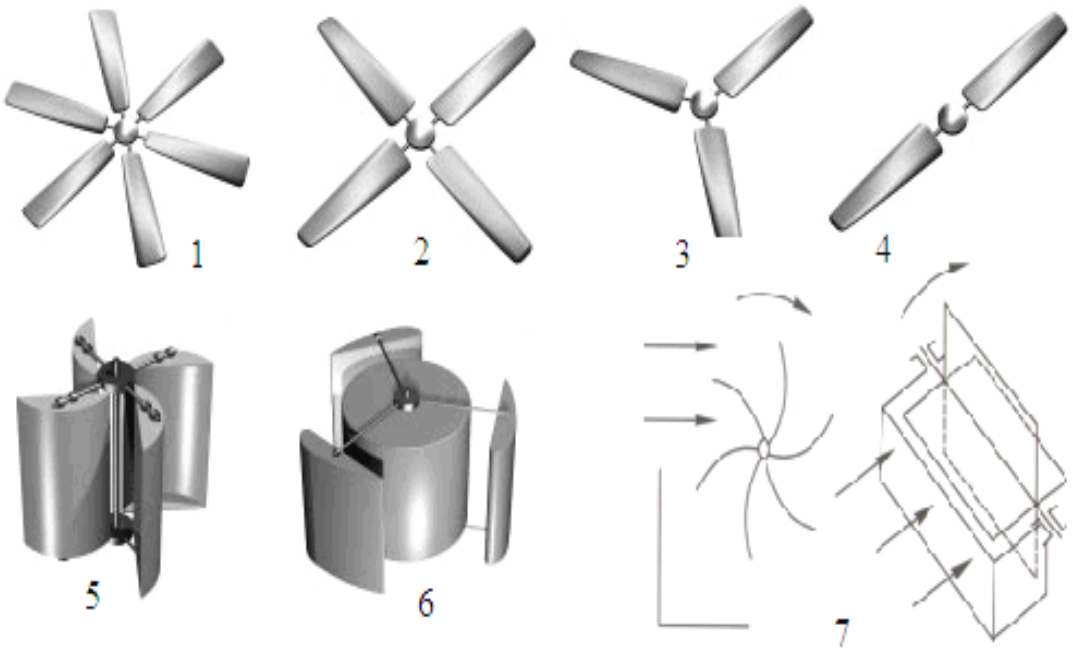
- *карусельные,* у которых нерабочие лопасти либо прикрываются ширмой, либо располагаются ребром против ветра (рисунок 7.1, поз. 5);

- *роторные* ветродвигатели системы Савониуса.

К *третьему классу* относятся ветродвигатели, работающие по принципу водяного мельничного колеса и называемые *барабанными* **(**рисунок 7.3, поз.7**)**. У этих ветродвигателей ось вращения горизонтальна и перпендикулярна направлению ветра.

Основные недостатки карусельных и барабанных ветродвигателей вытекают из самого принципа расположения рабочих поверхностей ветроколеса в потоке ветра:

1) Так как рабочие лопасти колеса перемещаются в направлении воздушного потока, ветровая нагрузка действует не одновременно на все лопасти, а поочерёдно. В результате каждая лопасть испытывает прерывную нагрузку, коэффициент использования энергии ветра получается весьма низким и не превышает 10 %.



1,2 – крыльчатые многолопастные; 3,4- крыльчатые малолопастные; 5 – карусельный; 6 – ортогональный ; 7- барабанный.

Рисунок 7. 1 - Типы ветродвигателей

2) Поверхности ветроколеса не могут двигаться быстрее ветра.

3) Размеры используемой части воздушного потока малы по сравнению с размерами самого колеса, что значительно увеличивает его вес, отнесённый к единице установленной мощности ветродвигателя.

Карусельные ветродвигатели обладают тем преимуществом, что могут работать при любом направлении ветра, не изменяя своего положения. У роторных ветродвигателей системы Савониуса наибольший коэффициент использования энергии ветра 18 %.

Карусельные ветродвигатели *тихоходны* и это позволяет использовать простые электрические схемы. Но тихоходность требует использование многополюсного генератора, работающего на малых оборотах.

Карусельный лопастный ветродвигатель наиболее прост в эксплуатации, обеспечивает максимальный момент при запуске ветродвигателя и автоматическое саморегулирование максимальной скорости вращения в процессе работы. С увеличением нагрузки уменьшается скорость вращения и возрастает вращающий момент вплоть до полной остановки. У карусельных – намного больше момент вращения.

Крыльчатые ветродвигатели свободны от перечисленных выше недостатков карусельных и барабанных ветродвигателей. Хорошие аэродинамические качества крыльчатых ветродвигателей, конструктивная возможность изготовлять их на большую мощность, относительно лёгкий вес на единицу мощности – *основные преимущества* этих ветродвигателей.

Коммерческое применение крыльчатых ветродвигателей началось с 1980 года. За последние 14 лет мощность ветродвигателей увеличилась в 100 раз: от 20…60 кВт при диаметре ротора около 20 м в начале 1980 годов до 5000 кВт при диаметре ротора свыше 100 м к 2003 году.

Крыльчатые ветродвигателей отличаются также количеством лопастей.

Для крыльчатых ветродвигателей, наибольшая эффективность которых достигается при действии потока воздуха перпендикулярно к плоскости вращения лопастей крыльев. С этой целью применяют *крыло-стабилизатор* - устройство автоматического поворота оси вращения.

Коэффициент использования энергии ветра у крыльчатых ветродвигателей намного выше, чем у карусельных. Распространение крыльчатых ветроагрегатов объясняется величиной скорости их вращения. *Она обратно пропорциональна количеству крыльев*, поэтому агрегаты с количеством лопастей больше трех практически не используются. Они могут непосредственно соединяться с генератором.

Основные классифицирующие признаки ветроэнергетических установок можно определить по следующим критериям:

1) Если ось вращения ветроколеса параллельна потоку, установка горизонтально-осевой, если перпендикулярна, то вертикально-осевой.

2) Установки, использующие в качестве вращающей силы силу сопротивления (*драг-машины*), как правило, вращаются с линейной скоростью, меньше скорости ветра, а установки, использующие подъемную

силу (*лифт-машины*), имеют линейную скорость концов лопастей, существенно больше скорости ветра.

3) *ВЭУ с большим геометрическим заполнением* (с большим числом лопастей) ветроколеса развивают значительную мощность при относительно слабом ветре, и максимум мощности достигается при небольших оборотах колеса. *ВЭУ с малым заполнением* достигают максимальной мощности при больших оборотах и дольше выходят на этот режим. Поэтому первые установки используются, например, в качестве водяных насосов и даже при слабом ветре сохраняют работоспособность, вторые – в качестве электрогенераторов, где требуется высокая частота вращения.

4) Установки для непосредственного выполнения механической работы часто называют *ветряной мельницей или турбиной*, а установки для производства электроэнергии – *ветро- или аэроэлектрогенераторами*.

5) У аэрогенераторов, подключенных напрямую к мощной энергосистеме, частота вращения постоянна вследствие эффекта ассинхронизации, но такие установки менее эффективно используют энергию ветра, чем установки с переменной частотой вращения.

6) Ветроколесо может быть соединено с электрогенератором напрямую (жесткое сопряжение) или через промежуточный преобразователь энергии, выполняющий роль буфера. Наличие буфера уменьшает последствия флуктуации частоты вращения ветроколеса, позволяет более эффективно использовать энергию ветра и мощность электрогенератора. Кроме того, существуют частично развязанные схемы соединения колеса с генератором, называемые мягкосопряженными. Нежесткое соединение, наряду с инерцией ветроколеса, уменьшает влияние флуктуаций скорости ветра на выходные параметры электрогенератора.

*Ветроколесо с горизонтальной осью***.** Основной вращающей силой у колес этого типа является подъемная сила. В ВЭУ обычно используются двух- и трехлопастные ветроколеса, последние отличаются очень плавным ходом. Электрогенератор и редуктор, соединяющий его с ветроколесом, расположены обычно на верху опорной башни.

Многолопастные колеса, развивающие большой крутящий момент при слабом ветре, используются для перекачки воды и других целей, не требующих высокой частоты вращения ветрового колеса.

Ветроэлектрогенераторы с вертикальной осью вращения (рисунок 7.2*)* при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Кроме того, такая схема позволяет за счет только удлинения вала установить редуктор с генераторами внизу башни.

Принципиальными недостатками таких установок являются: гораздо большая подверженность их усталостным разрушениям из-за более часто возникающих в них автоколебательных процессов и пульсация крутящего момента. Из-за этого подавляющее большинство ветроэлектрогенераторов выполнено по горизонтально-осевой схеме.

Наиболее распространенные типы вертикально-осевых установок:

1) *Чашечный ротор (анемометр).* Чашеобразная форма обеспечивает практически линейную зависимость частоты вращения колеса от скорости.

2) Ротор Савониуса**.** Его лопасти выполнены из тонких изогнутых листов прямоугольной формы. Из-за большого геометрического заполнения это ветроколесо обладаем большим крутящим моментом.

3) *Ротор Дарье.* Вращающий момент возникает на двух или на трех тонких изогнутых несущих поверхностях, имеющих аэродинамический профиль. Он используется в ветроэлектрогенераторах. Раскручиваться самостоятельно ротор, как правило, не может, поэтому для его запуска обычно используется генератор, работающий в режиме двигателя.

4) *Ротор Масгрува***.** Лопасти этого ветроколеса в рабочем состоянии расположены вертикально, но имеют возможность вращаться или складываться вокруг горизонтальной оси при отключении.

5) *Ротор Эванса*. Лопасти этого ротора в аварийной ситуации и при управлении поворачиваются вокруг вертикальной оси.

Концентраторы. Одним из способов ее повышения мощности ветроэнергоустановки является использование специальных концентраторов

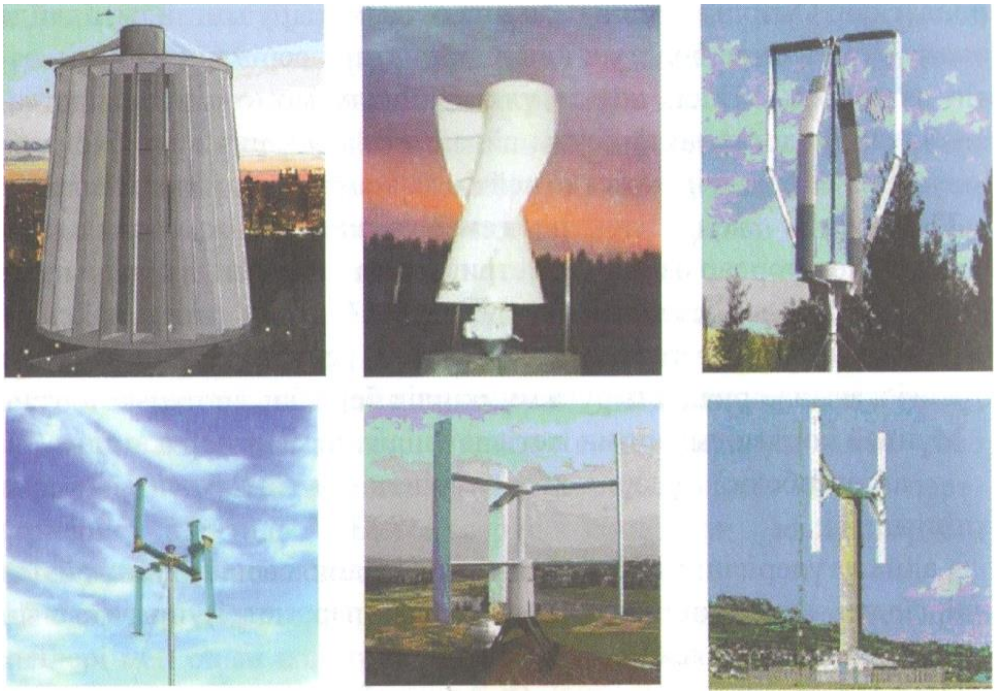


Рисунок 7.2 - Ветроэлектрогенераторы с вертикальной осью

(усилителей) воздушного потока. Это могут быть диффузоры или конфузоры (дефлекторы), направляющие на ветроколесо воздушный поток с площади, большей ометаемой площади ротора, и другие устройства.

Вертикально-осевая ветровая роторная турбина Болотова (ВРТБ). ВРТБ состоит из внешней неподвижной части – статора и расположенного внутри него вращающегося ротора, лопатки которого, образуют активную и реактивную ступени турбины (рисунок 7.3).

Направляющий аппарат имеет пластины, равномерно расположенные по его периметру, ротор имеют лопатки, также равномерно расположенные по его периметру. Статор и ротор определенной высоты, связанные подшипниками, совместно образуют модуль турбины. Диаметр модуля по направляющему аппарату и высота формируют площадь ветровоспринимающей поверхности.

Рисунок 7.3 – Общий вид ВРТБ со статором, имеющим 12 пластин и ротором, имеющим 9 лопаток

Диаметр модуля определяется расчетной скоростью ветра в месте размещения ВРТБ, высота - необходимой мощностью турбины в конкретных условиях потребителя электроэнергии, а также по конструктивным соображениям и условиям устойчивости.

Работа турбины не зависит от направления ветра. По отношению к набегающему с любой стороны воздушному потоку турбина имеет две стороны - подветренную – активная ступень турбины и надветренную – реактивная ступень турбины. В статоре турбины на активной стороне воздух сжимается направляющим аппаратом и направляется на лопатки ротора.

Действующая на лопатку ротора сила возникает под влиянием давления на вогнутую поверхности, создающего в режиме паруса вращающий момент турбины и обеспечивающий высокий момент трогания ротора.

На выпуклой поверхности лопатки возникает подъемная сила, перпендикулярная вектору скорости обтекающего лопатку воздушного потока, двигающая лопатку по окружности. Отсюда следует, что тяга лопатки, вызванная действием ветра, может создаваться как за счет разряжения на ее выпуклой поверхности, так и в результате давления на ее вогнутую поверхность. В реактивной части ступени турбины тяга на лопатках создается в результате преобразования избыточного давления внутри турбины, в полости ротора за активной ступенью, по отношению к атмосферному. Диффузорная конфигурация межлопаточных пространств между лопатками ротора и между пластинами направляющего аппарата способствуют удалению из турбины отработавшего воздуха и повышению коэффициента использования энергии ветра. Диаметр турбины увеличивается при

необходимости получения заданной мощности и корректируется по расчетной скорости ветра в месте предполагаемой ее установки.

Из конструктивных соображений высота турбины делится на отдельные «модули» высотой 2-3метра. Установка модулей друг на друга образует высоту турбины в соответствии с конкретными ветровыми условиями для получения необходимой мощности.

Ветроэлектростанции (ВЭС) с вертикально – осевыми турбинами обладают большим числом преимуществ по сравнению с пропеллерными:

- отсутствие зависимости развиваемой мощности от направления ветра;
- способность работать на порывистых и ураганных ветрах;
- генератор соединен непосредственно с ротором;
- возможность использовать несколько виндроторов на одном генераторе;
- наличие направляющего аппарата, увеличивающего удельную мощность ротора в 2- 2, 5 раза по сравнению с открытым ротором;
- отсутствие внешних вращающихся частей.

Вертикально осевая турбина, построенная по принципу рабочих элементов «парус-крыло», усиливаемого наличием направляющего аппарата, имеет малую собственную постоянную времени и срабатывает порывы, пульсации и шквалы.

Компоненты ветроэлектростанции: генератор, ветроколесо, контроллер, аккумуляторная батерея, инвертор, автоматическое включение резервного питания, анемоскоп и датчики направления ветра (рисунок 7.4).

Существует два варианта работы ВЭС: автономная работа и параллельная работа с энергосистемой. Автономная работа реализуется по трем схемам. *Первая схема* включает генератора постоянного тока и аккумуляторную батарею и обеспечивает энергоснабжение только потребителей постоянного тока.

Вторая схема включает генератор постоянного тока или переменного тока и используется для получения тепла и его аккумулирования.

Третья схема включает генератор переменного тока, выпрямитель, буферный накопитель, инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный.

Параллельная работа в составе энергосистемы реализуется также по трем схемам.

Первая схема включает синхронный генератор, который должен вращать с постоянной скоростью. Недостатком является возможный переход генератора в двигательный режим, связанный с потреблением энергии из энергосистемы.

Во второй схеме имеется только один генератор, включенный в энергосистему асинхронно. Скорость вращения ротора может быть непостоянной, но не должна сильно отличаться от синхронной скорости.

Третья схема состоит из генераторной системы с автоматической системой регулирования, вращающаяся непостоянной скоростью, но вырабатывающий ток постоянной частоты.

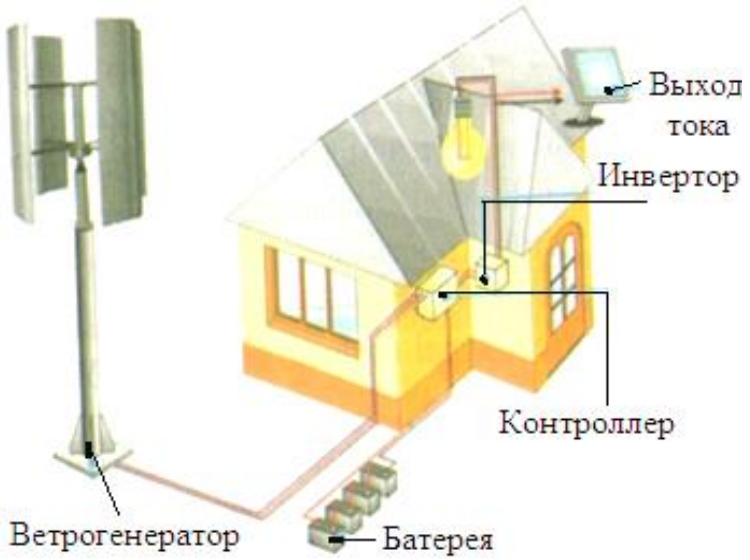


Рисунок 7.4 - Автономная система электроснабжения на базе ветрогенератора

Лекция №8. Гидроэнергетика. Энергия движущейся воды. Структурные схемы и основные компоненты гидроэлектростанций

Содержание лекции: водные ресурсы, работа водного потока, структурные схемы гидроэлектростанций, состав и компоновка основных сооружений, гидравлические турбины и генераторы гидроэлектростанций.

Цель лекции: показать способы и технические средства преобразования энергии движущейся воды в электроэнергию, возможности развития «малой гидроэнергетики» в Казахстане.

Водные и гидроэнергетические ресурсы, работа водного потока. Водными ресурсами называются поверхностные и подземные воды, используемые или которые могут быть использованы для различных целей жизнеобеспечения общества.

В связи с постоянным перемещением воды в природе, ее круговоротом, водные ресурсы являются возобновляемыми.

Часть водных ресурсов, которая может быть использована для производства электроэнергии, относится к гидроэнергетическим ресурсам. Для выработки электрической энергии могут быть использованы приливы и отливы мирового океана, морские волны, глобальные морские течения, такие как, например, Гольфстрим и Куросиво, вода рек и тепло океана.

Гидравлическая энергия рек представляет собой *работу*, которую совершает текущая в них вода. В естественном состоянии эта работа

расходуется на преодоление внутреннего сопротивления движению воды, сопротивление на трение в русле и различное эрозионное воздействие - размыв дна и берегов русла, перемещение продуктов размыва.

Эксергия воды определяется «падением» реки, т.е. разностью уровней воды в начале и в конце рассматриваемого участка водотока и расходом в единицу времени. Если падение участка водотока (реки) длиной *L*, м, составляет *H*, м, то при расходе воды *Q*, $м^3$/сек, работа текущей воды в течение 1 сек, т.е. мощность водотока *N* на рассматриваемом участке с учетом потерь в гидротехнических сооружениях, подводящих воду из реки к турбинам, в самих турбинах и генераторах ГЭС, составляет:

$$N=\rho gQH\eta=9{,}81QH\eta, \text{ кВт}, \qquad (8.1)$$

где g – плотность воды, равная 1000 кг/$м^3$;

g – ускорение свободного падения м/$с^2$;

η - коэффициент полезного действия.

Энергия водотока Э, определяемая произведением мощности *N* на время *t*, сек, составляет, кВт·ч,

$$Э = 9{,}81QHt\eta / 3600 = WH\eta / 367 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \qquad (8.2)$$

где W=Qt – объем протекающей воды, $м^3$.

Обычно разность уровней воды в верховьях и устьях равнинных рек иногда достигает несколько десятков метров, а в горной местности перепад высот, создающий напор ГЭС, достигает многих сотен метров.

Расход воды в реке можно определить, измеряя среднюю скорость речного потока *v м/сек* и площадь сечения реки в месте замера S $м^2$.

Место входа воды в гидротехнические сооружения гидроэлектростанции носит название «верхний бьеф», места выхода воды из турбины станции называется «*нижний бьеф*».

Структурные схемы и основные компоненты гидроэлектростанций. Для превращения речного стока в гидроэнергетические ресурсы и электроэнергию необходимо несколько компонентов:

- *водохранилище*, образующееся при перегораживании русла реки плотиной, создающей напор воды перед турбиной;

- *деривация* – каналы и трубопроводы, подающие воду в турбины;

- *турбины*, преобразующие, поступательное движение воды во вращательное движение ротора;

- *электрогенераторы*.

Водохранилище отличается от естественного водоема - озера - тем, что оно сооружается на реке специально для регулирования речного стока и имеет переменный уровень, зависящий от величины поступления воды и расхода ее через турбины ГЭС.

Существуют две основные схемы создания напора: *плотинная и деривационная.* Гидроэлектростанции, сооруженные по плотинной схеме, делятся в свою очередь на два типа: *русловые и приплотинные*.

Деривационные ГЭС также делятся на два типа: *с безнапорной и с напорной деривацией.*

Основными сооружениями ГЭС, выполненными по плотинной схеме, являются *плотины и здание ГЭС.*

При напоре до 25- 30 м здание станции размещается в одном комплексе с плотиной и воспринимает напор воды. Такие гидроэлектростанции называются *русловыми. У приплотинной ГЭС* здание размещается за плотиной и напор воды не воспринимает.

Плотины являются основными сооружениями гидроузла для создания напора и регулирования стока.

Плотины делятся на две группы по используемым материалам для их возведения: *плотины бетонные* (железобетонные) и *плотины из грунтовых материалов* (земляные и каменно-набросные).

Плотины могут быть *глухими*, т. е. не допускающими перелива воды через гребень, и *водосливными*. Последние выполняются с поверхностными водосливами или заглубленными (донными) отверстиями для пропуска воды.

Сооружения деривационных ГЭС располагаются на двух уровнях – верхнем – головной водозабор и нижнем - станционном, соединенных между собой трубопроводом.

Безнапорная деривация выполняется в виде открытого (в виде туннеля или трубопровода) канала. У станционного узла канал заканчивается, переходит в напорный бассейн, откуда вода по турбинным трубопроводам поступает к турбинам, расположенным в здании ГЭС, и далее в отводящий канал и в русло реки.

Гидравлической турбиной называется устройство, преобразующее энергию движущейся воды в механическую энергию вращения его колеса.

Из закона Бернулли — следует, что удельная энергия H_1 на входе в рабочее колесо гидротурбины и H_2 на выходе из рабочего колеса составляет

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{qg} + \frac{v_1^2}{2g}, \tag{8.3}$$

$$H_2 = z_2 + \frac{p_2}{qg} + \frac{v_2^2}{2g}, \tag{8.4}$$

где p — давление, Па;

q — плотность жидкости, кг/м^3;

g — ускорение свободного падения, м/с^2;

z — отметка уровня центра потока относительно принятой плоскости сравнения (высота), м;

v - скорость, м/с.

Отданная водой рабочему колесу энергия будет равна разности энергий в потоке до рабочего колеса и после него:

$$H = H_1 - H_2 = z_1 - z_2 + \frac{p_1 - p_2}{qg} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}. \qquad (8.5)$$

Таким образом, вся энергия потока стоит из энергии положения z_1-z_2 , энергии давления (второе слагаемое), образующих вместе потенциальную энергию) и кинетической энергии (третье слагаемое).

Гидротурбины, использующие *хотя бы частично потенциальную энергию,* называются *реактивными.*

В таких гидротурбинах процесс преобразования энергии на рабочем колесе происходит с избытком давления. Кроме того, в рабочем колесе турбины частично используется и кинетическая энергия потока.

$$z_1\text{-}z_2 + (p_1\text{-}p_2)/qg > 0 . \qquad (8.6)$$

Если гидротурбины используют *только кинетическую энергию потока,* то они называются *активными.* В таких турбинах $z_1=z_2$, $p_1=p_2$, т. е. вода поступает на рабочее колесо без избыточного давления, а почти весь напор преобразуется в скорость.

Принято гидротурбины подразделять на классы, системы, типы и серии.

Класс реактивных гидротурбин объединяет следующие системы: *осевые (пропеллерные и поворотно-лопастные*), *диагональные и радиально-осевые гидротурбины.*

В классе активных гидротурбин наибольшее распространение получили, так называемые, *ковшовые* гидротурбины.

Геометрически подобные гидротурбины различных размеров образуют серию. Кроме того, все гидротурбины условно делят *на низко-, средне- и высоконапорные.*

Гидротурбины условно подразделяют *на малые, средние и крупные*.

К малым относятся гидротурбины, у которых мощность составляет не более 1000 кВт. *К средним* относятся гидротурбины мощностью от 1000 кВт до 15 000 кВт. *К крупным* относятся гидротурбины, которые имеют мощность большую, чем средние.

Активные гидротурбины. Схема *ковшовой турбины* приведена на рисунке. 8.1. Вода из верхнего бьефа 1 подводится трубопроводом 2 к рабочему колесу 4, выполненному в виде диска, закрепленного на горизонтальном валу турбины и вращающегося в воздухе. По окружности диска расположены ковшеобразные лопасти (ковши) 7. Ковши равномерно распределяются по ободу рабочего колеса и последовательно, один за другим, при его вращении «принимают» струю воды. Подвод воды к рабочему колесу осуществляется через сопло 3, внутри которого расположена регулирующая игла.

Сопло представляет собой сходящийся насадок, из отверстия которого при работе турбины выбрасывается струя воды, вся энергия которой, за

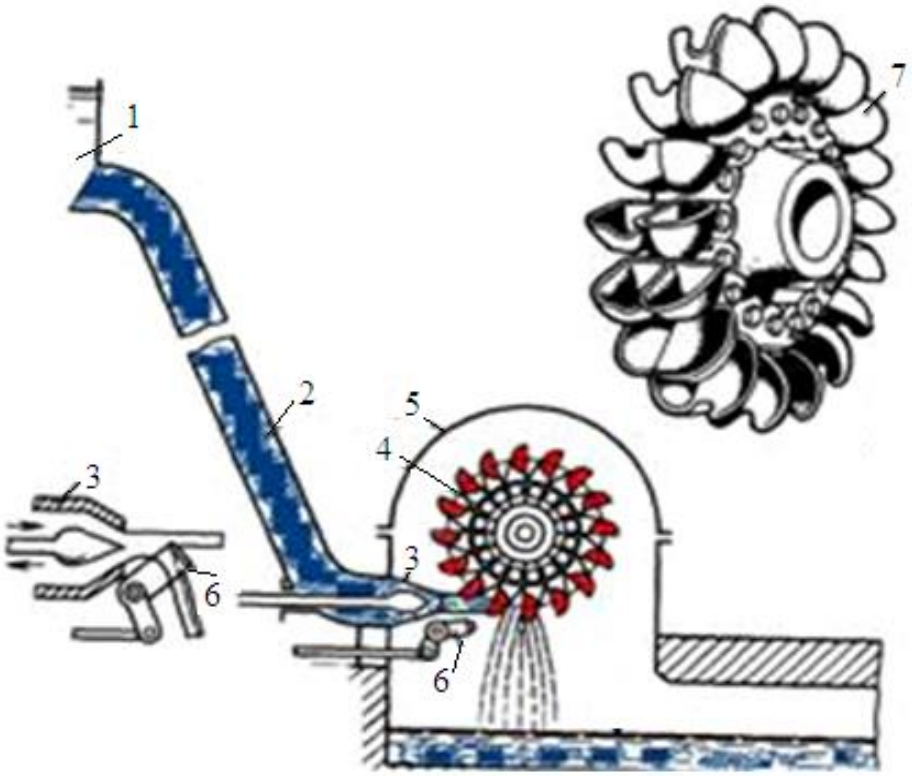


Рисунок 8.1 - Схема активной турбины (Алматинская ГЭС-1, АПК)

вычетом потерь, обращается в кинетическую энергию вращения колеса турбины. Рабочее колесо и сопло размещаются внутри замкнутого кожуха 5. Игла может менять его выходное сечение и тем самым регулировать расход воды через турбину. В одном из крайних положений игла полностью закрывает сопло, что ведет к остановке турбины. Вода, отдав свою энергию рабочему колесу, стекает с него в отводящий канал (нижний бьеф).

В целях предотвращения гидравлического удара, игла закрывается медленно. А для предотвращения разгона турбины до опасных оборотов и быстрой остановки применяется отвод струи от рабочего колеса в нижний бьеф с помощью отклонителя 6. При экстренном выводе турбины из работы ввод отклонителя струи и перемещение иглы производится одновременно.

Ковшовые турбины могут различаться по расположению вала (вертикальные, горизонтальные), по числу сопел и колес на одном валу.

Ковшовые турбины используются в диапазоне напора 300 - 1770 м с диаметром рабочего колеса до 7,5 м. Известна турбина мощностью 300 МВт.

Реактивные турбины. К реактивным гидротурбинам относятся: радиально-осевые, пропеллерные, поворотно-лопастные и диагональные. Общий вид рабочих колес представлен на рисунок 8.2.

Для реактивных гидротурбин характерны следующие основные признаки. Рабочее колесо располагается полностью в воде, поэтому поток передает энергию одновременно всем лопастям рабочего колеса.

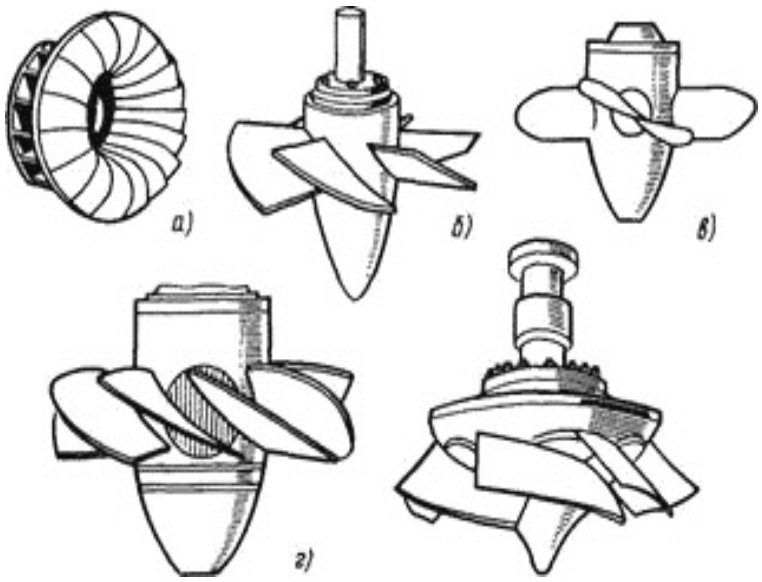
Перед рабочим колесом только часть энергии воды находится в кинетической форме, остальная представлена потенциальной энергией, соответствующей разности давлений до и после колеса.

Избыточное давление *p/(Qg)* по мере протекания воды по проточному тракту рабочего колеса расходуется на увеличение относительной скорости, т.е. на создание реактивного давления потока на лопасти. Изменение направления потока за счет кривизны лопастей приводит к возникновению активного давления потока.

Пропеллерные гидротурбины. Рабочее колесо 1 состоит из корпуса (втулки) с обтекателем 2 и лопастей 3, установленных под углом разворота φ (рисунок 8.3). На лопасти рабочего колеса поток поступает только в осевом направлении, вследствие чего такие гидротурбины называют также осевыми.

Для подвода воды к направляющему аппарату 5 гидротурбины служит турбинная камера 4. Число лопастей рабочего колеса зависит от напора и может колебаться от 3 до 8 (растет с увеличением напора).

Поворотно-лопастные гидротурбины по конструктивному исполнению не отличаются от пропеллерных, но у них в процессе работы лопасти рабочего колеса могут поворачиваться вокруг своих осей, перпендикулярных оси вала.



а) радиально-осевая; б) пропеллерная; в) поворотно-лопастная; г) двухперовая; д) диагональная.

Рисунок 8.2 - Общий вид рабочих колес реактивных турбин

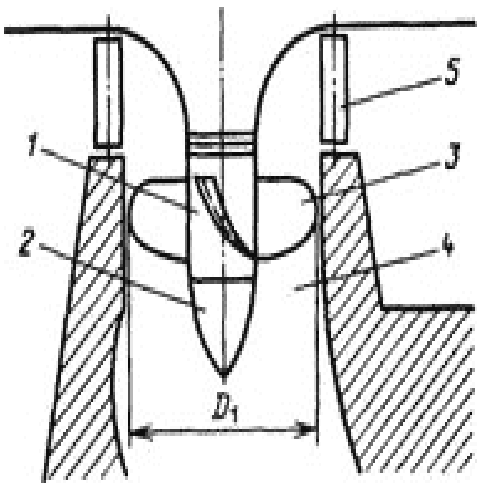


Рисунок 8.3 - Рабочее колесо пропеллерной турбины

Изменяя угол установки лопастей при различных открытиях направляющего аппарата, а следовательно, при различной мощности, можно найти такое положение лопастей, при котором КПД гидротурбины будет иметь наибольшее значение. Лопасти рабочего колеса при работе гидротурбины могут поворачиваться на некоторый (оптимальный) угол (отсюда название поворотно-лопастные) одновременно с изменением открытия направляющего аппарата. Такое двойное регулирование дает

большие преимущества, так как обеспечивается автоматическое поддержание высокого значения КПД в широком диапазоне мощностей.

Турбины ГЭС малой мощности. Для комплектации ГЭС малой мощности применяются следующие системы активных турбин: *ковшовые, наклонно-струйные и двукратные.*

Наиболее простая в конструктивном отношении – *двукратная турбина* (рисунок 8.4). Она имеет горизонтальный вал с двумя, а иногда с тремя дисками, между которыми закреплены изогнутые лопасти, расположенные своими продольными кромками параллельно валу турбины.

Вода к турбине подводится плоским соплом шириной несколько меньшей, чем ширина лопастей рабочего колеса турбины.

Вода из сопла поступает на лопасти рабочего колеса и, пройдя внутри колеса, вновь поступает на лопасти, но уже с внутренней стороны, отдав еще раз энергию, она выходит наружу. Таким образом, вода дважды попадает на лопасти рабочего колеса, поэтому турбина и называется двукратной. При первом прохождении струи через лопасти колеса, она отдает ему 70–80 % полезной энергии и при втором 30–20 %. Такие турбины мощностью от 1 до 250 кВт чаще применяют при напорах от 2 до 100 м.

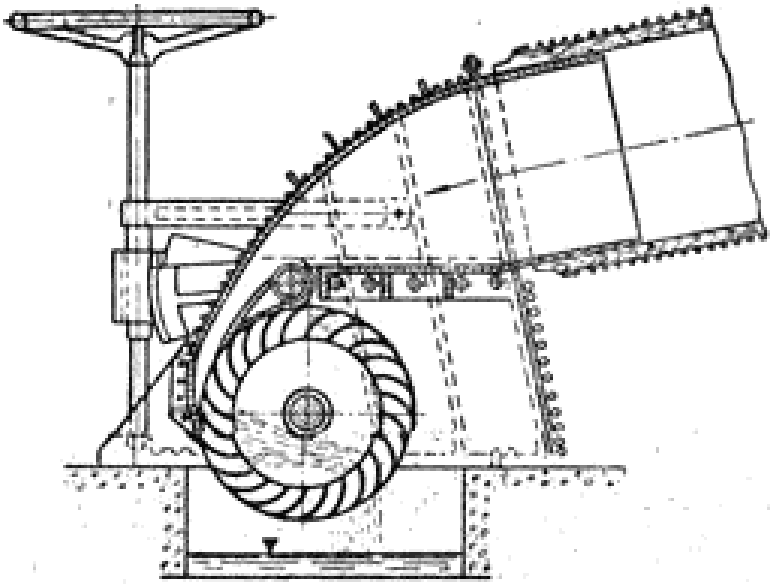


Рисунок 8.4 - Двукратная турбина

Генераторы гидроэлектростанций и потенциал гидроэнергетики. Для комплектации ГЭС используются *явнополюсные синхронные генераторы* с частотой вращения ротора в пределах от 20 до 1000 об/мин. Такой широкий диапазон частот вращения связан с большим разнообразием расходов и напоров воды, используемых на гидростанциях. Как правило, генераторы ГЭС выполняются в ограниченном количестве по индивидуальным проектам.

Потенциал гидроэнергетики Республики Казахстан образуется учетом перспективных для строительства и восстановления крупных, средних, малых и мини гидроэлектростанций на реках и гидросооружениях. Так, в

Алматинской области имеется возможность строительства 9 ГЭС мощностью более 50 МВт - с суммарной мощностью 1325,4 МВт, 34 ГЭС мощностью от 10 до 50 МВт суммарной мощностью 820,4 МВт. Итого по 17 ГЭС мощностью от 1 до 10 МВт - 97,8 МВт. Суммарная мощность 9 мини ГЭС мощностью до 1 МВт на разных реках составляет 7,2 МВт.

Большой экономический эффект возникает при создании местных энергетических систем, использующих три вида возобновляемых энергетических ресурсов – воды, ветра и солнца. Это определяется тем, что летом солнечная энергия больше чем зимой, реки несут больше воды, весенние паводковые воды могут накапливаться в водохранилище и срабатываться по мере необходимости. Ветровая активность более высокая в зимнее время и тогда потребность в электроэнергии может удовлетворяться за счет ветроэлектростанций. Примером такого удачного сочетания являются ветер, Солнце Джунгарских ворот и водные ресурсы втекающей в Джунгарские ворота горной реки Ыргайты.

Удельная стоимость сооружения гидроэлектростанций находится в пределах 6000 – 7000 долл. США за 1 кВт установленной мощности.

Лекция №9. Геотермальная энергетика. Использование геотермального тепла в системах теплоснабжения

Содержание лекции: тепло Земли, схемы и принцип работы геотермального теплоснабжения.

Цель лекции: показать возможности и способы использования геотермального тепла в системах теплоснабжения.

Тепловой режим земной коры. Под геотермикой понимается наука, изучающая тепловое состояние земной коры и Земли в целом, его зависимость от геологического строения, состава горных пород, магматических процессов и целого ряда других факторов.

В ядре планеты максимальная температура *достигает 4000 °С.* Выход тепла через твердые породы суши и океанского дна происходит главным образом за счет теплопроводности (геотермальное тепло) и реже – в виде конвективных потоков расплавленной магмы или горячей воды.

Средний поток геотермального тепла через земную поверхность составляет примерно 0,06 Вт/м^2 при температурном градиенте менее 30 °С/км. Этот непрерывный поток тепла обычно сравнивают с аналогичными величинами, связанными с другими возобновляемыми источ-никами и в среднем в сумме составляющими 500 Вт/м^2. Однако имеются районы с повышенными градиентами температуры, где потоки составляют примерно 10…20 Вт/м^2, что позволяет реализовать геотермальные станции тепловой мощностью 100 МВт/км^2. На любой глубине H температура горных пород (T) приближенно может быть определена по формуле:

$$T = t_k + \frac{H + h}{c}, \qquad (9.1)$$

где $t_в$ – средняя температура воздуха данной местности;

h – глубина слоя постоянных годовых температур;

c – геотермическая ступень.

Средняя величина геотермической ступени равна 33 м, и с углублением от зоны постоянной температуры на каждые 33 м температура повышается на 1°С.

Величина, соответствующая углублению в метрах, при котором температура повышается на 1 °С, называется *геотермической ступенью.*

Теплопередача от полужидкой мантии поддерживает температурную разность между внешней и внутренней поверхностями сравнительно тонкой коры Земли (примерно 30 км) около 1000 °С при среднем градиенте температур 30 °С/км. Принято выделять *три класса геотермальных районов*.

*Геотермальный. Т*емпературный градиент – более 80 °С/км. Эти районы расположены в тектонической зоне вблизи границ континентальных плит. Первый такой район был задействован для производства электроэнергии в 1904 г. вблизи Лардерелло (Италия). Почти все из существующих ГеоТЭС размещены именно в таких районах.

Полутермальный. Температурный градиент – примерно от 40 до 80 °С/км. Подобные районы связаны главным образом с аномалиями, лежащими в стороне от границ платформ. Извлечение тепла производится из естественных водоносных пластов или из раздробленных сухих пород. Хорошо известный пример такого района находится вблизи Парижа и используется для обогрева зданий.

Нормальный. Температурный градиент – менее 40 °С/км. Такие районы наиболее распространены, именно здесь тепловые потоки в среднем составляют примерно 0,06 Вт/м^2. В таких районах экономически не выгодно извлекать тепло из недр.

В земной коре существует подвижный и чрезвычайно теплоемкий энергоноситель – вода. *Жидкая вода* существует только до глубин 10…15 км, ниже при температуре около 700 °С вода находится исключительно в газообразном состоянии. На глубине 50…60 км при давлениях около $3 \cdot 10^2$ атм исчезает граница фазовости, т. е. водяной газ приобретает такую же плотность, что и жидкая вода.

В соответствии с температурой теплоносителя все геотермальные источники подразделяют на *эпитермальные, мезотермальные и гипотермальные.*

К эпитермальным источникам обычно относят источники горячей воды с температурой 50…90 °С, расположенные в верхних слоях осадочных пород, куда проникают почвенные воды.

К мезотермальным источникам относят источники с температурой

воды 100…200 °С.

В гипотермальных источниках температура в верхних слоях превышает 200 °С и практически не зависит от почвенных вод.

В Жаркенте Алматинской области имеются пригодные для промышленого использования термальные воды с температурой 88-96^{0}С.

В настоящее время проведены в Казахстане геотермические исследования на глубинах до 6500 м с интервалом 500 м, в том числе по *Прикаспийской впадине (*до глубины 6500 м, макс. температура 118 ^{o}С, макс. градиент 27 ^{o}С/км), *Мангышлак-Устюртской системе (* до глубины 3250 м, макс. температура 150 ^{o}С, макс. градиент 35,8 ^{o}С/км.), *Тургаю и Северному Приаралью* (до глубины 2900 м, макс. температура 100 ^{o}С, макс. градиент 27,8 ^{o}С/км), *Иртышской впадине* (до глубины 2000 м, макс. температура 60 ^{o}С, макс. градиент 58 ^{o}С/км), *Илийской впадине* (до глубины 3800 м, макс. температура 165 ^{o}С, макс. градиент 32 ^{o}С/км), *Сырдарьинской впадине* (до глубины 2100 м, макс. температура 83 ^{o}С, макс. градиент 40 ^{o}С/км), *Чу-Сарысуйской впадине* (до глубины 1400 м, макс. температура 63 ^{o}С, макс. градиент 28 ^{o}С/км).

Использование геотермального тепла в системах теплоснабжения. В настоящее время разработаны различные схемы использования термальных вод для отопления и горячего водоснабжения жилых и промышленных зданий (температура воды не ниже 50…60 °С).

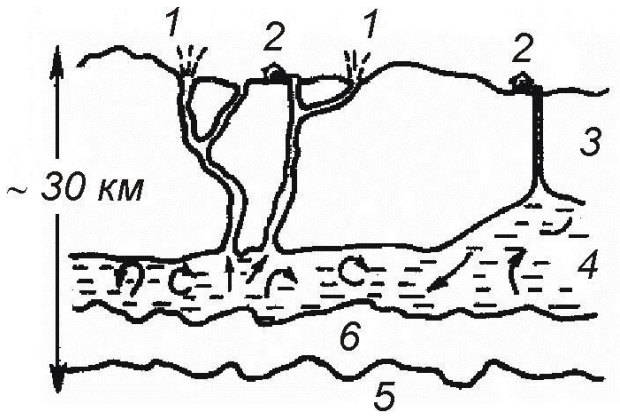
Наиболее успешно реализованные проекты имеют скважины, *пробуренные непосредственно в естественные подземные коллекторы* геотермальных районов (рисунок 9.1). Подобные методы используются для извлечения энергии из водоносных слоев в высокотермальных районах, где природного напора достаточно, чтобы обойтись без насосных систем.

Последние разработки направлены на *извлечение тепла из сухих горных пород,* так как они могут обеспечить большую производительность, чем водные источники. Разработала методы дробления скал гидроразрывом с помощью холодной воды, нагнетаемой под давлением в скважину (рисунок 9.2). После предварительного дробления пород вода нагнетается через питающую скважину, фильтруется через скальные породы на глубине около 5 км при температуре 250 °С, теплая вода возвращается на поверхность через приемную скважину. Две такие скважины могут обеспечить энергией установку мощностью порядка гигаватта.

Геотермальные тепловые станции предназначены для обеспечения централизованного теплоснабжения потребителей, расположенных вблизи геотермальных месторождений. Принцип построение ГТС достаточно прост и основные проблемы связаны с высоким содержанием солей в термальных водах, что требует выполнения теплообменников из высоко коррозионно-стойких материалов.

Теплоснабжение высокотемпературной сильно минерализованной термальной водой. Термальная вода имеет температуру выше 80 °С, но сильно минерализована. В этих условиях возникает необходимость в

устройстве промежуточных теплообменников. Принципиальное решение такой схемы показано на рисунке 9.3.



1 – естественный гейзер; 2 – энергетическая станция; 3 – глубокая скважина (5 км); 4 – пароводяной источник; 5 – мантия;6 – горячие скальные породы.

Рисунок 9.1 - Схема размещения гидротермальных станций в гипертермальном районе

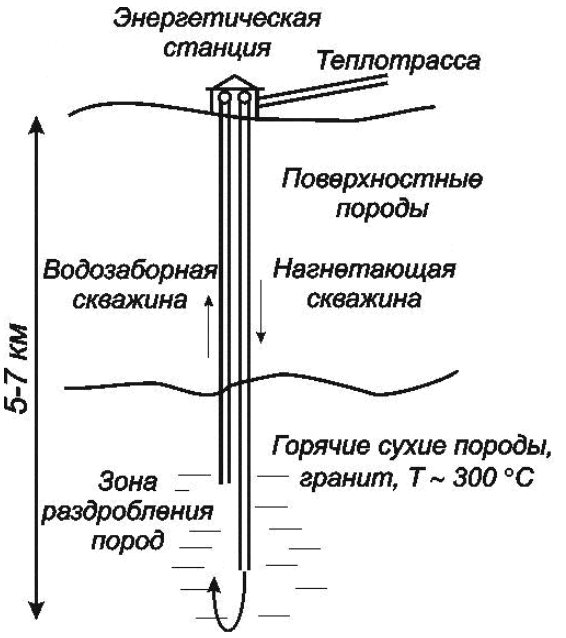


Рисунок 9.2 - Схема извлечения тепла из сухих горных пород

Здесь термальная вода из скважин разделяется на две параллельные ветви: одна направляется в теплообменник отопления и затем в теплообменник 1-й ступени подогрева воды для горячего водоснабжения; вторая – в теплообменник 2-й ступени. Чтобы избежать зарастания трубопровода, термальную воду используют с промежуточным теплообменником. Высокоминерализованную воду из скважины подают в резервуар со змеевиками, по которым поступает пресная речная вода. Нагретая пресная вода идет к потребителю, а выпадающие из термальных вод соли осаждаются в резервуаре и на наружных поверхностях змеевика.

Недостатком схемы с теплообменником является сокращение срабатываемого потенциала термальной воды (на конечную разность температур в теплообменнике).

Теплоснабжение низкотемпературной маломинерализованной термальной водой. Термальная вода маломинерализована, но с низким тепловым потенциалом (температура ниже 80 °С). Здесь требуется повышение потенциала термальной воды. Осуществить это можно разными методами, приведем основные из них:

а) подача термальной воды параллельно на отопление и горячее водоснабжение и пиковый догрев отопительной воды (рисунок 9.4).

По этой схеме термальная вода из скважин поступает в систему горячего водоснабжения и параллельно в пиковую котельную. Здесь она

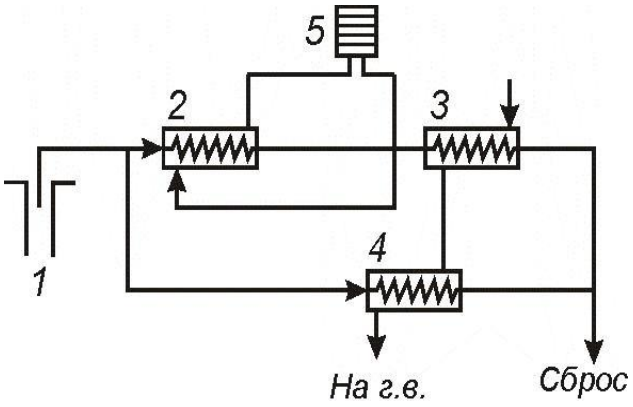
догревается до температуры, соответствующей метеорологическим условиям, и подается в системы отопления.

Данная схема особенно целесообразна для районов с дорогим бурением, так как пиковая котельная позволяет сократить число скважин.

в) применение тепловых насосов.

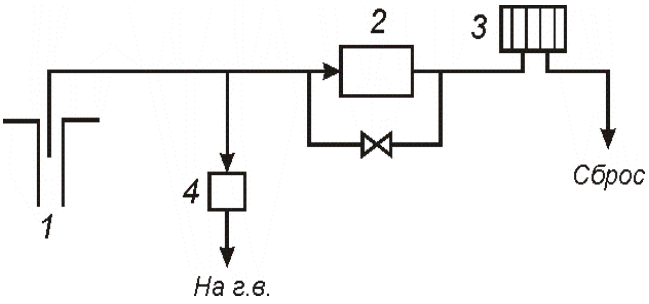
Схема предусматривает утилизацию тепла низкотемпературных термальных источников при помощи теплового насоса.

Тепловой насос - устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии с низкой температурой к потребителю теплоносителя с более высокой температурой,



1 – скважина; 2 – теплообменник системы отопления; 3 – теплообменник горячего водоснабжения 1-й ступени; 4 – то же 2-й ступени; 5 – система отопления.

Рисунок 9.3 - Принципиальная схема геотермального теплоснабжения с теплообменниками



1 – скважина; 2 – пиковый догреватель; 3 – система отопления; 4 – бак-аккумулятор.

Рисунок 9.4 - Схема геотермального теплоснабжения с параллельной подачей геотермальной воды на отопление и горячее водоснабжение и пиковым догревом воды на отопление

Термодинамически тепловой насос представляет собой обращённую холодильную машину. Конденсатор является теплообменным аппаратом, выделяющим теплоту для потребителя, а испаритель - теплообменным аппаратом, утилизирующим низкопотенциальную теплоту, находящуюся в водоемах, грунтах, сточных водах и тому подобное (рисунок 9.5). В зависимости от принципа работы тепловые насосы подразделяются на компрессионные и абсорбционные. *Компрессионные тепловые насосы* всегда приводятся в действие с помощью электромотора, в то время как *абсорбционные тепловые насосы* могут также использовать тепло в качестве источника энергии. Для компрессора нужен также источник низкопотенциального тепла.

В процессе работы компрессор потребляет электроэнергию. Соотношение вырабатываемой тепловой энергии и потребляемой электрической называется *коэффициентом трансформации* (или коэффициентом преобразования) и служит показателем эффективности

теплового насоса. Эта величина зависит от разности уровня температур в испарителе и конденсаторе: чем больше разность, тем меньше эта величина.

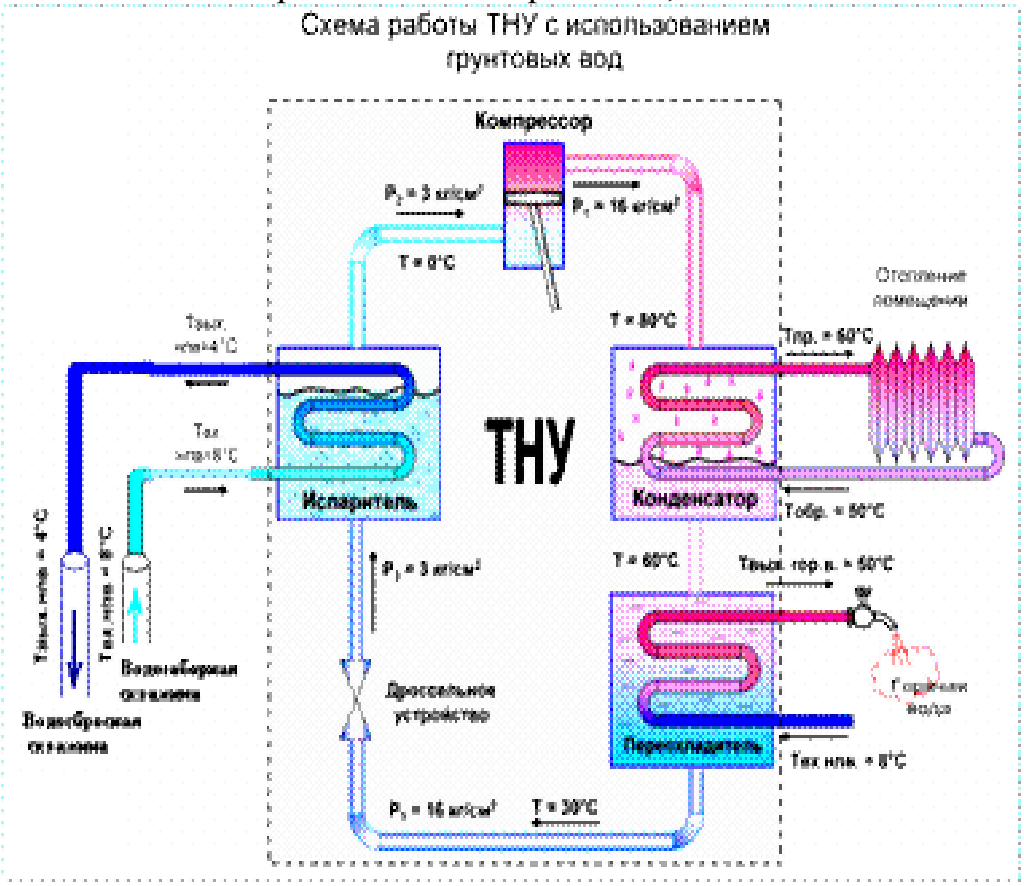


Рисунок 9.5 – Схема работы теплового насоса

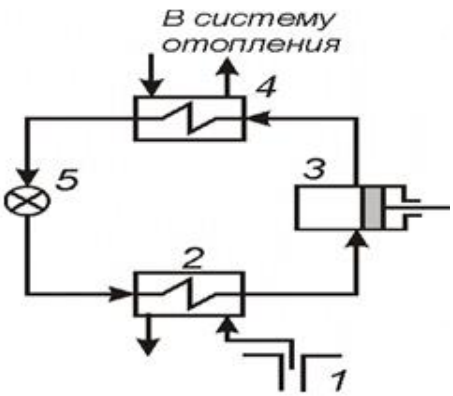
Реальные значения эффективности современных тепловых насосов составляют порядка COP =2.0 при температуре источника −20 °C, и порядка COP = 4.0 при температуре источника +7 °C.

По виду теплоносителя во входном и выходном контурах насосы делят на шесть типов: «грунт—вода», «вода—вода», «воздух—вода», «грунт—воздух», «вода—воздух», «воздух—воздух».

На рисунке 9.6 показана типовая схема теплоснабжения с компрессионным тепловым насосом. Горячая вода из скважин 1 подается к испарителю теплового насоса 2, где происходит передача ее тепла быстро испаряющемуся рабочему веществу. Образующиеся пары сжимаются компрессором 3 и направляются в конденсатор 4, где конденсируются при более высоком давлении, отдавая тепло воде, циркулирующей в системе отопления. Охлажденная вода сбрасывается в канализацию.

При использовании в качестве источника тепла энергии грунта трубопровод, в котором циркулирует жидкость, зарывают в землю на 30-50 см ниже уровня промерзания грунта в данном регионе (рисунок 9.7).

Для установки теплового насоса производительностью 10 кВт необходим земляной контур длиной 350—450 м, для укладки которого потребуется участок земли площадью около 400 м² (20×20 м).



1 – скважина; 2 – испаритель;
3 – компрессор; 4 – конденсатор;
5 – регулирующий вентиль.

Рисунок 9.6 - Принципиальная схема геотермального теплоснабжения с применением теплового насоса

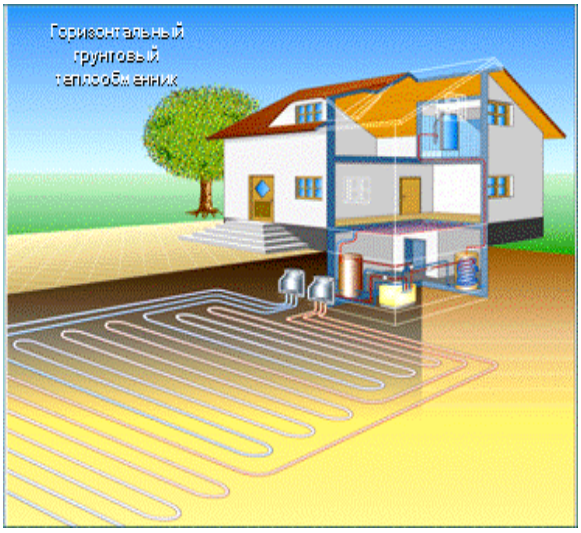


Рисунок 9.7 - Использование в качестве источника тепла энергии грунта

Лекция №10. Использование геотермального тепла для выработки электроэнергии

Содержание лекции: схемы и принципы работы систем геотермального электроснабжения.

Цель лекции: показать возможности и способы использования геотермального тепла в системах электроснабжения.

Тепло в виде горячих источников и гейзеров может быть использовано для производства электроэнергии по различным схемам на геотермальных электростанциях (ГеоЭС). Наиболее легко выполнимой схемой является схема с применением пара жидкостей, имеющих низкую температуру кипения. Горячая вода из природных источников, обогревая такую жидкость в испарителе, обращает ее в пар, используемый в турбине и служащей приводом генератора тока.

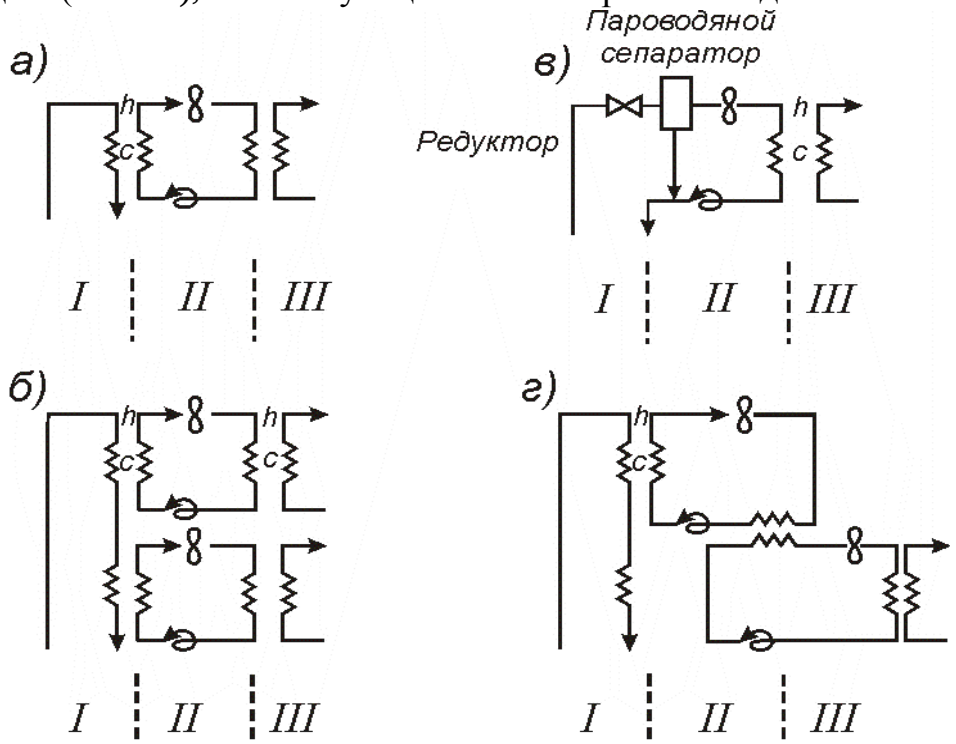
На рисунке 10.1 показаны примеры организации цикла для производства электроэнергии: цикл с одним рабочим телом, например с водой или фреоном (рисунок 10.1, *а*); цикл с двумя рабочими телами – водой и фреоном (рисунок 10.1, *б*); прямой паровой цикл (рисунок 10.1, *в*) и двухконтурный цикл (рисунок 10.1, *г*).

Технологии производства электрической энергии в значительной степени зависят от теплового потенциала термальных вод.

Высокопотенциальные месторождения позволяют использовать практически традиционные конструкции тепловых электростанций с паровыми турбинами.

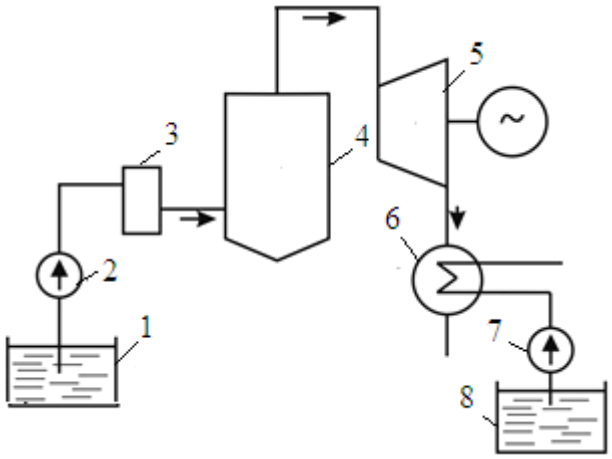
На рисунке 10.2 представлена наиболее простая схема небольшой

электростанции (ГеоЭС), использующей тепло горячего подземного



I – геотермальный источник; II – турбинный цикл; III – охлаждающая вода.

Рисунок 10.1 - Примеры организации цикла для производства электроэнергии



1 – приемник горячей воды; 2 – насос горячей воды; 3 – газоудалитель; 4 – испаритель; 5 – паровая турбина с генератором тока; 6 – конденсатор; 7 – циркуляционный насос; 8 – приемник охлаждающей воды.

Рисунок 10.2 - Схема небольшой ГеоЭС

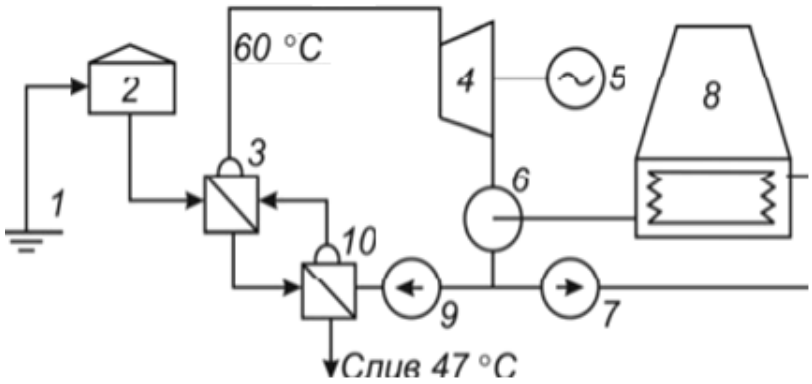
источника. Вода из горячего источника с температурой около 95 °С насосом 2 подается в газоудалитель 3, где происходит отделение растворенных в ней газов. Далее вода поступает в испаритель 4, в котором происходит ее превращение в насыщенный пар и небольшой перегрев за счет тепла пара (от вспомогательного котла), предварительно отработавшего в эжекторе конденсатора. Слегка перегретый пар совершает работу в турбине 5, на валу ко-торой находится генератор тока. Отработавший пар конденсируется в

конденсаторе 6, охлаждаемом водой с обычной температурой. Такие простейшие установки функционировали в Африке уже в 50-х годах.

Очевидным вариантом конструкции современной энергоустановки является геотермальная электростанция с низкокипящим рабочим веществом, представленная на рисунке 10.3. Горячая вода из бака-аккумулятора поступает в испаритель 3, где отдает свое тепло какому-либо веществу с низкой температурой кипения. Такими веществами могут быть углекислота, различные фреоны, шестифтористая сера, бутан и др.

Конденсатор 6 – смешивающего типа, который охлаждается холодным жидким бутаном, поступающим из поверхностного воздушного охладителя. Часть бутана из конденсатора питательным наосом 9 подается в подогреватель 10, а затем в испаритель 3.

Важной особенностью этой схемы является возможность работы в зимнее время с низкими температурами конденсации. Эта температура может быть близкой к нулю или даже отрицательной, т. к. все перечисленные вещества имеют очень низкие температуры замерзания. Это позволяет значительно расширить пределы температур, используемых в цикле.



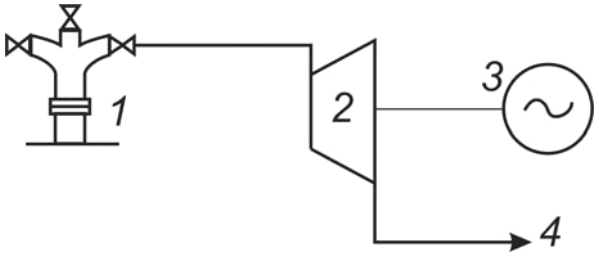
1 – скважина; 2 – бак-аккумулятор; 3 – испаритель; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – конденсатор; 7 – циркуляционный насос; 8 – поверхностный воздушный охладитель; 9 – питательный насос; 10 – подогреватель рабочего вещества.

Рисунок 10.3 - Схема геотермальной электростанции с низкокипящим рабочим веществом

Геотермальная электростанция с непосредственным использованием природного пара. Самая простая и доступная геотермальная энергоустановка представляет собой паротурбинную установку с противодавлением (рисунок 10.4). Природный пар из скважины подается прямо в турбину с последующим выходом в атмосферу или в устройство, улавливающее ценные химические вещества.

В турбину с противодавлением можно подавать вторичный пар или пар, получаемый из сепаратора. По этой схеме электростанция работает без конденсаторов, и отпадает необходимость в компрессоре для удаления

из конденсаторов неконденсирующихся газов. Эта установка наиболее простая, капитальные и эксплуатационные затраты на нее минимальны. Она занимает небольшую площадь, почти не требует вспомогательного оборудования и ее легко приспособить как переносную геотермальную электростанцию.



1 – скважина; 2 – турбина; 3 – генератор;
4 – выход в атмосферу или на химический завод.

Рисунок 10.4 - Схема геотермальной электростанции с непосредственным использованием природного пара

Рассмотренная схема может стать самой выгодной для тех районов, где имеются достаточные запасы природного пара. Рациональная эксплуатация обеспечивает возможность эффективной работы такой установки даже при переменном дебите скважин.

В Италии работает несколько таких станций. Одна из них – мощностью 4 тыс. кВт при удельном расходе пара около 20 кг/с или 80 т/ч; другая – мощностью 16 тыс. кВт, где установлено четыре турбогенератора мощностью по 4 тыс. кВт. Последняя снабжается паром от 7–8 скважин.

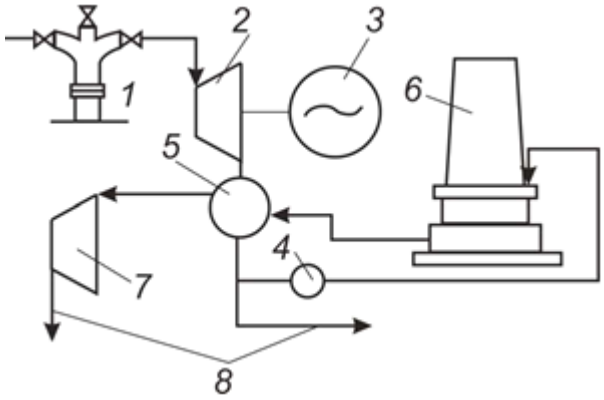
Геотермальная электростанция с конденсационной турбиной и прямым использованием природного пара (рисунок 10.5) – это наиболее современная схема для получения электрической энергии.

Пар из скважины подается в турбину. Отработанный в турбине, он попадает в смешивающий конденсатор. Смесь охлаждающей воды и конденсата уже отработанного в турбине пара выпускается из конденсатора в подземный бак, откуда забирается циркуляционными насосами и направляется для охлаждения в градирню. Из градирни охлаждающая вода опять попадает в конденсатор (рисунок 10.5). По такой схеме с некоторыми изменениями работают многие геотермальные электростанции: «Лардерелло-2» (Италия), «Вайракей» (Новая Зеландия) и др.

Областью применения двухконтурных энергоустановок на низкокипящих рабочих веществах (хладон-R12, водоаммиачная смесь,) является использование тепла термальных вод с температурой 100…200 °С, а также отсепарированной воды на месторождениях парогидротерм.

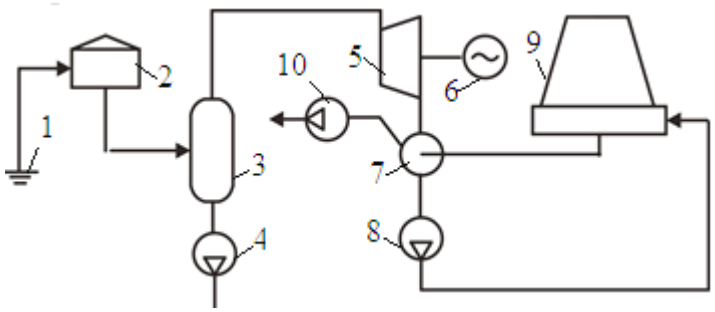
Комбинированное производство электрической и тепловой энергии возможно на геотермальных тепловых электрических станциях (ГеоТЭС). Наиболее простая схема ГеоТЭС вакуумного типа для использования тепла

горячей воды с температурой до 100°С приведена на рисунке 10.6.



1 – скважина; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – насос;
5 – конденсатор; 6 – градирня; 7 – компрессор; 8 – сброс.

Рисунок 10.5 - Схема геотермальной электростанции с конденсационной турбиной и прямым использованием природного пара



1 – скважина; 2 – бак-аккумулятор; 3 – расширитель; 4 – насос горячей воды;
5 – вакуумная турбина 750 кВт; 6 – генератор; 7 – смешивающий конденсатор;
8 – насос охлаждающей воды; 9 – вентиляторная градирня; 10 – вакуумный насос.

Рисунок 10.6 - Схема вакуумной ГеоТЭС с одним расширителем

Горячая вода из скважины 1 поступает в бак-аккумулятор 2. В баке она освобождается от растворенных в ней газов и направляется в расширитель 3, в котором поддерживается давление 0,3 атм. При этом давлении и при температуре 69 °С небольшая часть воды превращается в пар и направляется в вакуумную турбину 5, а оставшаяся вода насосом 4 перекачивается в систему теплоснабжения. Отработавший в турбине пар сбрасывается в смешивающий конденсатор 7. Для удаления воздуха из конденсатора устанавливается вакуумный насос 10. Смесь охлаждающей воды и конденсата отработавшего пара забирается из конденсатора насосом 8 и отдается для охлаждения в вентиляционную градирню 9. Охлажденная в градирне вода подается в конденсатор самотеком за счет разряжения.

Примером вакуумной ГеоТЭС является Верхне-Мутновская ГеоТЭС мощностью 12 МВт (3×4 МВт), которая используется для электроснабжения Петропавловск-Камчатского промышленного района.

Лекция №11. Энергетические ресурсы океана и их использование

Содержание лекции: энергетические ресурсы океана, схемы и принципы работы установок, использующих энергетические ресурсы океана и морей.

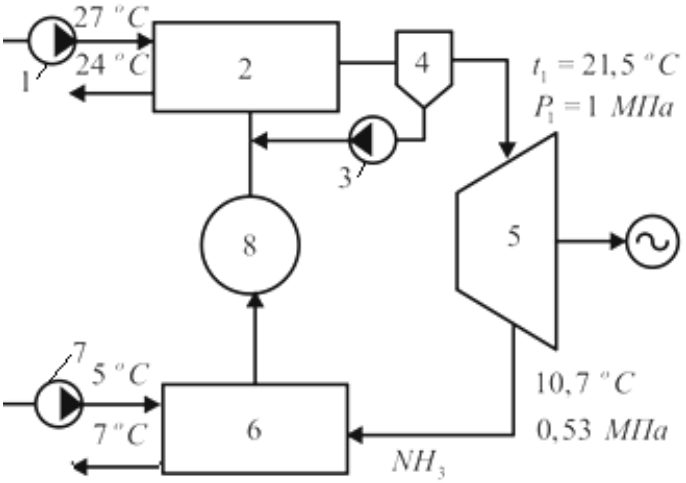
Цель лекции: показать возможности и способы использования энергетических ресурсов океана.

Использование тепловой энергии океана. Запасы энергии в Мировом океане колоссальны, ведь две трети земной поверхности занимают моря и океаны. Так, *тепловая (внутренняя) энергия*, соответствующая перегреву поверхностных вод океана по сравнению с донными, скажем, на 20 градусов, имеет величину 10^{26} Дж.

Кинетическая энергия океанских течений оценивается величиной *порядка* 10^{18} Дж**.** Пока используется лишь ничтожные доли этой энергии.

В 1979 году вблизи Гавайских островов начала работать теплоэнергетическая установка мини-ОТЕС (рисунок 11.1). Ее полная мощность составляла в среднем 48,7 кВт, максимальная – 53 кВт; 12 кВт (максимум 15) установка отдавала на полезную нагрузку.

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 испаритель. В качестве вторичной рабочей жидкости применяется аммиак.



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.

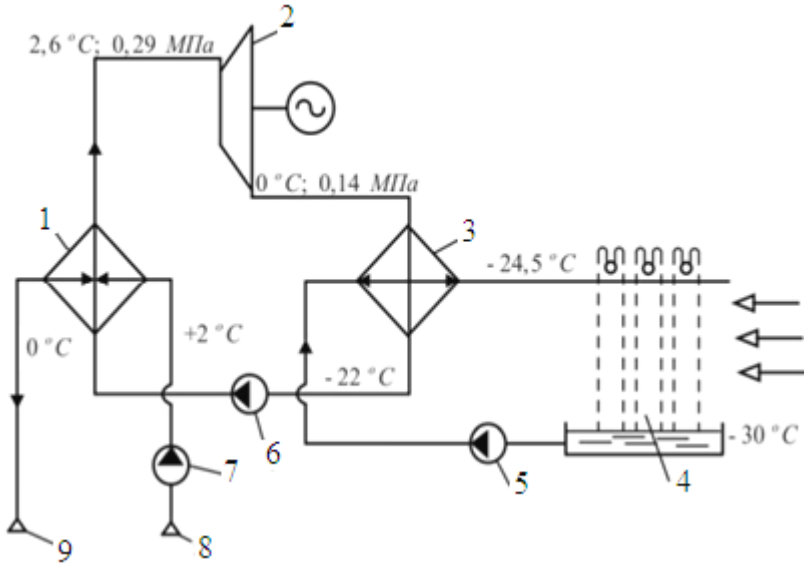
Рисунок 11.1 - Схема термальной установки, работающей по замкнутому циклу

В такой системе с помощью теплых поверхностных вод,

прокачиваемых насосом через теплообменник испарителя, превращают в пар какое-либо подходящее рабочее тело (аммиак, фреон, пропан), создают пар повышенного давления, давая ему возможность расшириться через турбину в холодильник, где пар конденсируется при контакте с охлаждаемыми поверхностями второго теплообменника, омываемого водой, закачиваемой из глубинных слоев океана.

Для перепадов температур между поверхностными и глубинными слоями воды в пределах от 15 до 26 °С он соответственно изменяется в диапазоне от 5 до 9 %. Реальный КПД существенно ниже (2,5%).

Использование перепада температур «океан-атмосфера». На рисунке 11.2 приведена разработанная А.К. Ильиным и В.В. Тикменовым схема АОТЭС с обдуваемыми воздухом теплообменниками.



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 – патрубок сброса отработанной воды.

Рисунок 11.2 - Схема арктической ОТЭС на перепаде «вода–воздух»

Идея использования перепада температур между холодным воздухом и незамерзающей (теплой) водой подо льдом Арктики впервые была высказана во Франции А. Баржо. Особенность работы таких станций – так называемый «треугольный» цикл: нагрев и испарение рабочего тела в результате политропного процесса, адиабатное расширение через турбину, изотермическое сжатие при подаче в испаритель с одновременным отводом избыточного тепла в холодильнике.

Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Возможно прямое преобразование тепловой энергии океана в электрическую. Оно осуществляется при помощи *термоэлектрических преобразователей*. В основе их действия – *явление Зеебека*, заключающееся в возникновении разности потенциалов в электрической цепи, составленной из материалов с

различной концентрацией носителей заряда, места соединений которых нагреты до разных температур. КПД таких преобразователей, выполненных на полупроводниковых элементах, может достигать 10 %. Достоинство полупроводниковых систем – возможность обеспечения достаточно высокой теплоизоляции между нагревателем и холодильником, что сильно влияет на КПД систем.

К недостаткам таких систем относятся достаточно высокая стоимость материалов, из которых изготовляются элементы, и необходимость изолировать спаи от непосредственного контакта с морской водой, что приводит к удорожанию преобразователей и ухудшению их показателей.

Использование энергии приливов и отливов. Могучее природное явление – ритмичное движение морских вод вызывают силы притяжения Луны и Солнца. Решающую роль играет прилив, вызванный Луной (лунный прилив).

В морских просторах приливы чередуются с отливами теоретически 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. Когда же Солнце стоит под прямым углом к отрезку Земля–Луна, наступает слабый прилив (квадратурный, или малая вода). Сильный и слабый приливы чередуются через семь дней.

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

$$W=\rho g S R^2, \qquad (11.1)$$

где ρ – плотность воды;

g – ускорение силы тяжести;

S – площадь приливного бассейна;

R – разность уровней при приливе.

Один из современных устройств для преобразования энергии приливных течений показан на рисунке 11.3.

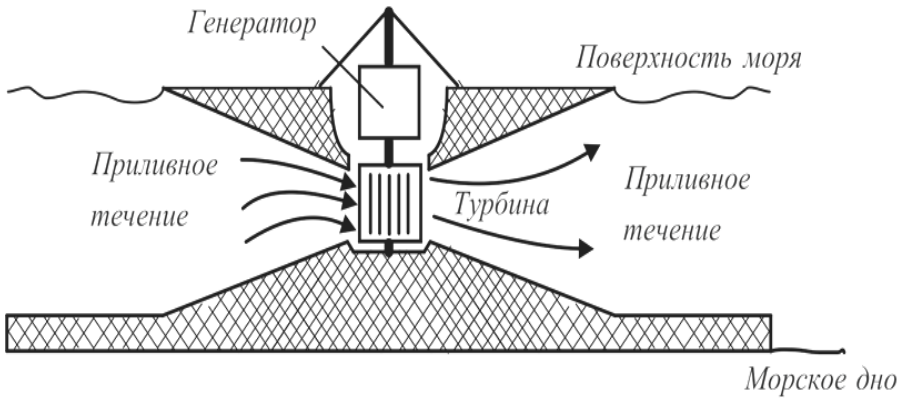


Рисунок 11.3 - Схема электростанции на приливном течении

Капитальные затраты на создание подобных устройств в расчете на 1 кВт установленной мощности достаточно высоки.

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 м работает ПЭС мощностью 240 тыс. кВт с годовой отдачей 540 тыс. кВт·ч.

Использование энергии морских течений. Кинетическую энергию морских течений можно превращать в механическую и электрическую энергию с помощью турбин, погруженных в воду. Энергию P, которую несет поток воды, можно выразить формулой:

$$P = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^2, \qquad (11.2)$$

где m – масса воды, кг;

ρ – плотность воды, кг/м^3;

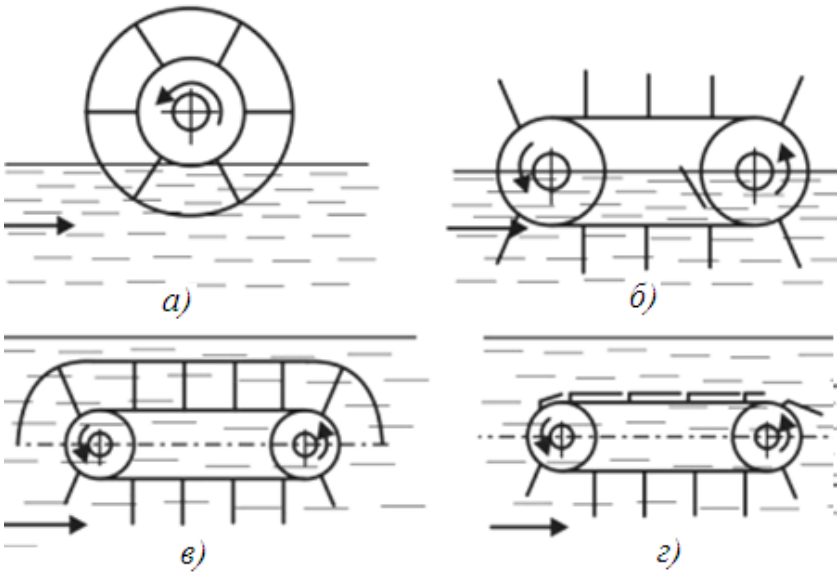
A – поперечное сечение течения, м^2;

v – скорость течения, м/с.

Важнейшее и самое известное морское течение – Гольфстрим. Ширина течения - 60 км, глубина - до 800 м, а поперечное сечение – 28 км^2, скорость – 0,9 м/с. Подставив цифры, получим мощность P =50 000 МВт.

К первой группе преобразователи энергии течений целесообразно отнести те из них, в основу которых положен принцип преобразования скоростного напора во вращательное движение турбин. *Ко второй*, менее многочисленной, группе относят преобразователи, основанные на других физических принципах (объемные насосы, упругие преобразователи и др.).

Родоначальником устройств первой группы по праву считают водяное колесо (рисунок 11.4, а). Ленточное колесо (рисунок 11.4, б) оказывается более компактным, требует меньше материалов, менее подвержено



а – колесо-прототип; б – ленточное колесо на плавучем основании; в – ленточное колесо в толще потока; г – ленточное колесо со складными лопастями.

Рисунок 11.4 - Эволюция водяного колеса

воздействию атмосферы. Эффективность преобразования скоростного напора повышается за счет того, что сразу несколько лопастей оказываются под воздействием потока. Простое увеличение числа лопастей ленточного колеса не приведет к существенному увеличению момента на валах.

На базе ленточного колеса созданы устройства, полностью погружаемые в толщу потоков (рисунок 11.4, в, г). Предлагается несколько способов уменьшения сопротивления движению ленты во время холостого хода. Это и сооружение воздушной камеры над колесом и применение различных вариантов механизмов складывания лопастей.

Использование энергии волн. Рассмотрим преобразователя типа «колеблющееся крыло», предложенного профессором Эдинбургского университета Стефана Солтера и названного в честь создателя «утка Солтера». Форма преобразователя обеспечивает максимальное извлечение мощности (рисунок 11.5).

Волны, поступающие слева, заставляют утку колебаться. Цилиндрическая форма противоположной поверхности обеспечивает отсутствие распространения волны направо при колебаниях утки вокруг оси. Мощность может быть снята с оси колебательной системы с таким расчетом, чтобы обеспечить минимум отражения энергии. Отражая и пропуская лишь незначительную часть энергии волн (примерно 5 %), это устройство обладает весьма высокой эффективностью преобразования в широком диапазоне частот возбуждающих колебаний.

Испытания, проведенные в 1977 году, показали, что рабочая модель океанского преобразователя (50-метровая гирлянда из 20-метровых «уток» общей массой 16 т) для первой английской волновой электростанции работала с КПД около 50 %.

Серьезными недостатками для «уток Солтера» оказались следующие:

- необходимость передачи медленного колебательного движения на привод генератора;
- необходимость снятия мощности с плавающего на значительной глубине устройства большой протяженности;
- вследствие высокой чувствительности системы к направлению волн необходимость отслеживать изменение их направления для получения высокого КПД преобразования;
- затруднения при сборке и монтаже из-за сложности формы поверхности «утки».

Другой преобразователь - *контурный плот Коккерелла* – многозвенная система из шарнирно-соединенных секций (рисунок 11.6). Как и «утка», он устанавливается перпендикулярно к фронту волны и отслеживает ее профиль.

Детальные лабораторные испытания модели плота в масштабе 1/100 показали, что его эффективность составляет около 45 %. Это ниже, чем у «утки» Солтера. Но плот привлекает другим достоинством: близость конструкции к традиционным судостроительным.

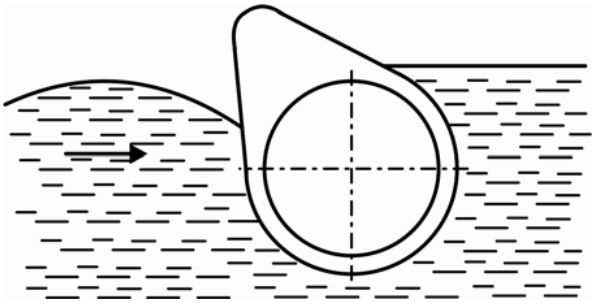
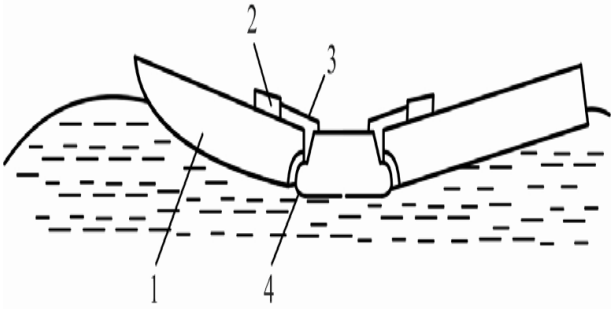


Рисунок 11.5 - «Утка Солтера» - схема преобразования энергии волны

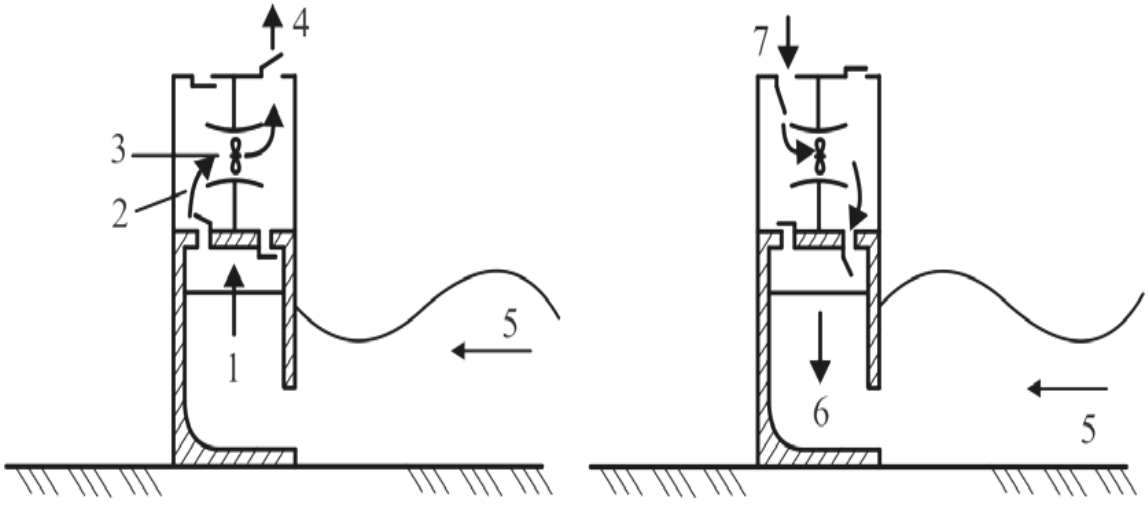


1 – колеблющаяся секция; 2 – преобразователь; 3 – тяга; 4 – шарнир.

Рисунок 11.6 - Контурный плот Коккерелла

Преобразователи, использующие энергию колеблющегося водяного столба работает следующим образом (рисунок 11.7). При набегании волны на частично погруженную полость, открытую под водой, столб жидкости в полости колеблется, вызывая изменения давления в газе над жидкостью. Полость может быть 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.

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



1 – волновой подъем уровня; 2 – воздушный поток; 3 – турбина; 4 – выпуск воздуха; 5 – направление волны; 6 – опускание уровня; 7 – впуск воздуха.

Рисунок 11.7 - Схема установки, в которой используется принцип колеблющегося водного столба

высокочастотным вращением турбины. Кроме того, здесь создается возможность удалить генерирующее устройство из зоны непосредственного воздействия соленой морской воды.

Лекция №12. Использование вторичных энергоресурсов (ВЭР)

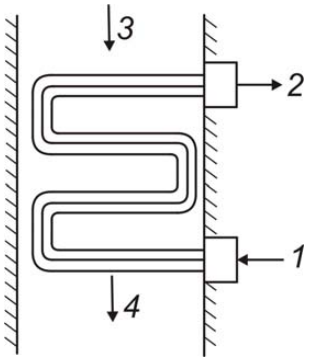
Содержание лекции: понятия о ВЭР, использование теплоты отработавших газов и теплоты низкого потенциала, детандер-генераторные установки, системы аккумулирования энергии, водородная энергетика, т опливные элементы, использование теплоты продукции и отходов.

Цель лекции: изучение возможности использования ВЭР в целях энергосбережения.

Вторичными энергоресурсами (ВЭР) будем понимать теплоту, отработавшую в основном технологическом процессе, но которая может быть использована для нужд энергетики – выработки электроэнергии и покрытия отопительной нагрузки. Экономические расчеты показывают, что использование ВЭР, которое приводит к экономии топлива, обходится в 2…4 раза дешевле капитальных затрат на добычу и транспортировку равноценного количества топлива.

Использование теплоты отработавших газов. В высокотемпературных плавильных процессах при нагреве и термообработке металла потери теплоты с отработавшими газами составляют от 35...40 до 65...70 %. Энергетическое использование теплоты газов, отработавших в металлургических, химических и других технологиях, позволяет сэкономить многие миллионы тонн условного топлива в год. Эта теплота может использоваться для систем отопления. Однако для систем отопления характерен сезонный и крайне неравномерный график потребления. Поэтому использование ВЭР для отопления и производства пара низких параметров, как правило, целесообразно только для установок малой тепловой мощности.

Для утилизации теплоты отходящих газов для теплоснабжения получила распространение схема змеевикового конвективного трубчатого рекуператора, показанная на рисунке 12.1.



1,2 – вход и выход нагреваемого газа; 3,4 – вход и выход греющего газа.

Рисунок 12.1 - Змеевиковый трубчатый теплообменник

Эта схема отличается малой металлоемкостью, хорошей газоплотностью, беспрепятственным температурным удлинением змеевиков.

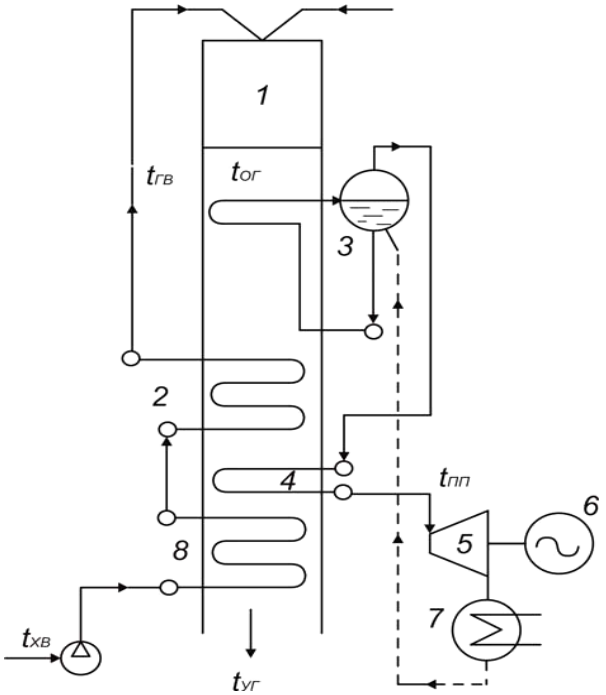
Для установок большой мощности оптимальной является утилизация теплоты отходящих газов *в производстве электроэнергии*.

Применение для этих целей воздушных турбинных установок неэффективно, КПД низкий – на уровне 20...25 %. Эффективнее оказались паротурбинные установки (рисунок 12.2).

Отходящие газы из рабочей камеры технологической установки 1 (например, из конвертора сталелитейного цеха) нагревают и испаряют питательную воду котла-утилизатора (КУ) 3. Водяной пар перегревается в пароперегревателе 4 и поступает в паровую турбину 5. Из конденсатора 7 питательная вода возвращается в котел. Воздух, подаваемый в рабочую камеру, подогревается в нижней 8 и верхней 2 ступенях рекуператора.

При высоких температурах отходящих газов (более 900 °С) КУ оборудуются радиационными поверхностями нагрева.

Котлы-утилизаторы разной мощности на различные параметры отходящих газов выпускает Белгородский котельный завод. Паропроизводительность D этих КУ лежит в пределах от 7 до 40 т пара в час, давление острого пара 1,3...4,5 МПа, температура 250...440 °С. Повышение параметров пара позволяет существенно увеличить экономию топлива в КУ.



1 – рабочая камера; 2 – горячая ступень рекуператора; 3 – котел-утилизатор; 4 – пароперегреватель; 5 – турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – нижняя ступень рекуператора.

Рисунок 12.2 - Схема ПТУ на теплоте отходящих газов

КУ, работающие на низкотемпературных отходящих газах ($t_{ОГ}$ = 550...650 °С), имеют КПД на уровне 60...65 %, тогда как КПД топочных котлов в наше время превышает 90 %.

Для использования теплоты низкотемпературных газов могут использоваться также котлы газотрубного типа, в которых отходящие газы текут со скоростью 6...8 м/с по трубам диаметра 50...60 мм. Однако они обеспечивают низкое давление пара (до 2 МПа) по условию прочности корпуса, а также имеют большую металлоемкость.

Высокотемпературные котлы-утилизаторы на отходящих газах устанавливают за плавильными и другими печами. Отходящие газы этих печей имеют температуру 1200...1300 °С.

Использование теплоты низкого потенциала. В тепловых насосах теплота тела с низкой температурой (например, речной воды в зимнее время) используется для отопления. В этом устройстве температура теплоносителя (обычно фреона), отобравшего теплоту от наружного низкотемпературного теплоисточника, повышается за счет затраты механической энергии до такого уровня, который пригоден для отопительных целей.

Величина отопительного коэффициента зависит от температур теплоисточника (окружающей среды) и обогреваемого помещения. В реальных установках он имеет значение от 3 до 4. Соответственно он дает значительную экономию по сравнению с непосредственным электронагревом. В Западной Европе теплонасосные установки получили широкое распространение. В Швеции более 50 % домов обогреваются тепловыми насосами.

Детандер-генераторные установки. На территории России расположена сеть магистральных газопроводов. Газ перекачивается под давлением, создаваемым компрессорными станциями. До 7 % перекачиваемого газа расходуется приводными установками компрессоров. На отводах от магистральных газопроводов к потребителям – к местным газораспределительным сетям – давление газа понижается от 5…6 МПа до 0,3…0,6 МПа. Этот перепад давления может использоваться газотурбинными установками (детандерами), позволяющими возвратить часть энергии, затраченной на привод компрессоров. При этом используется экологически чистый источник энергии – перепад давления природного газа.

Системы аккумулирования энергии. При суточной и сезонной неравномерности выработки электроэнергии значительная экономия традиционных энергоносителей может быть достигнута путем аккумулирования энергии, производимой в периоды ее минимального потребления. Особенно важно иметь системы, запасающие энергию впрок, при эксплуатации установок с нерегулярной выработкой в течение суток или более длительных периодов – ветровых, приливных, солнечных. Проблема не решается с применением электроаккумуляторов – они очень дороги, громоздки и имеют малую емкость. Гидроаккумулирующие станции позволяют вернуть в энергосистему в часы пик до 70 % энергии, запасенной в часы минимума потребления

Тепловая энергия может аккумулироваться веществами, которые при нагреве меняют свое агрегатное состояние, структуру или химический состав,

потребляя или выделяя при этом теплоту. Например, кристаллический сульфат натрия, если к нему при температуре 32,3 °С подводится теплота, теряет воду, входящую в состав кристаллов. Этот процесс дегидратации сопровождается поглощением большого количества теплоты, которое может снова выделиться при обратной реакции.

Водородная энергетика. Водород H_2 является идеальным топливом с высокой теплотой сгорания и безвредным продуктом горения – водяным паром. Водород является универсальным энергоносителем. Он может применяться в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок, тепловых электростанций, в технологических установках промышленности, в быту.

Водород можно получать термохимическим способом – нагревом водяного пара в присутствии различных катализаторов. Так, реакция $K_2O + H_2O = 2KOH$ приводит к образованию щелочи едкого калия. Затем добавляют калий и подводят теплоту при температуре 700 °С, в итоге получают реакцию $2KOH + 2K = K_2O + H_2$. Применяются также термохимичекие способы получения водорода из природного газа и нефти.

В настоящее время метод электролиза воды основан на реакции: $Электроэнергия + 2H_2O = 2H_2 + O_2$. КПД процесса электролиза достигает 85 %. Для широкого распространения производства водорода электролизом необходима дешевая электроэнергия, которую можно получать с ТЭС и АЭС в часы провала нагрузки.

Применение водородного топлива в автомобильных двигателях внутреннего сгорания приводит к повышению их КПД и резкому улучшению экологической чистоты воздуха. Однако это привела бы к увеличению массы и снижению дальности пробега автомобилей. Водород может также служить сырьем в ряде химических технологий и в металлургии.

Топливные элементы. Водород является оптимальным сырьем для топливных элементов, в которых электрический ток генерируется из химической энергии потребляемых компонентов, минуя тепловую энергию. Прямое преобразование химической энергии в электрическую происходит в топливных элементах без потерь, связанных с необходимостью отдавать часть подведенной теплоты в окружающую среду по второму закону термодинамики, поэтому топливные элементы имеют высокий КПД. При их работе практически не загрязняется окружающая среда. По принципу действия работа топливного элемента противоположна электролизу воды.

Водородно-кислородный топливный элемент (рисунок 12.3) работает следующим образом. Сосуд заполнен электролитом – например, раствором серной кислоты слабой концентрации. В элемент встроены каталитически активные платиновые электроды, один из которых является анодом, другой – катодом. Они соединены внешней электрической цепью.

Электроды разделены полупроницаемой мембраной. К одному электроду подается водород, к другому – в эквивалентных количествах кислород. На

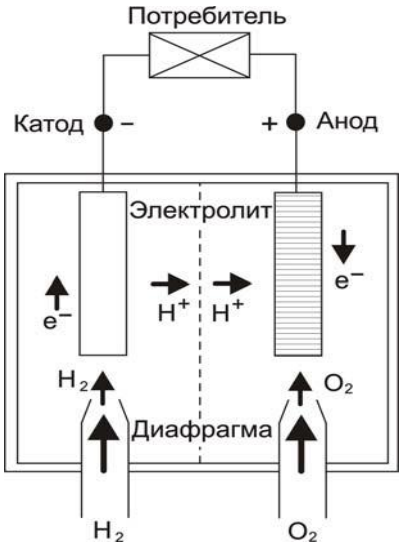


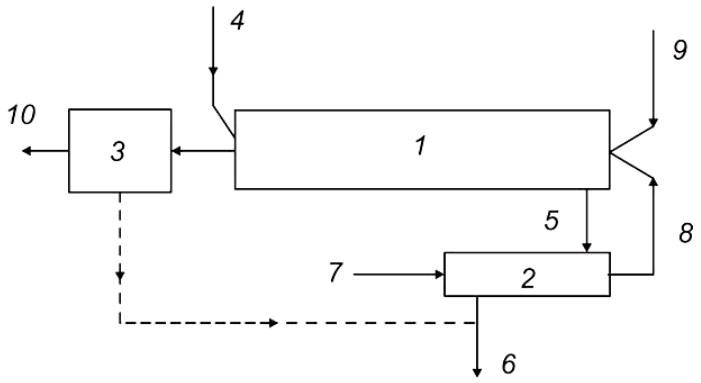
Рисунок 12.3 - Схема водородно-кислородного топливного элемента

катоде молекулы водорода H_2, благодаря каталитическому действию платины, распадаются на атомы, которые переходят в ионы H^+. Освободившиеся электроны через внешнюю цепь устремляются к аноду, создавая в цепи электрический ток. Положительные водородные ионы проходят через полупроницаемую мембрану в другую половину сосуда. На аноде пришедшие по электрической цепи электроны, атомы кислорода и положительные ионы водорода образуют нейтральные молекулы воды H_2O, поступающие в раствор. Включенная в электрическую цепь нагрузка потребляет электроэнергию, вырабатываемую топливным элементом.

В результате реакции химическая энергия пары реагентов водород кислород превращается в электроэнергию. Напряжение в цепи одного топливного элемента составляет около 1 В, поэтому элементы объединяются в батареи. КПД современных водородно-кислородных топливных элементов составляет около 80 %. В качестве исходного энергоносителя для топливных элементов могут использоваться, кроме водорода, и другие горючие газы, более дешевые и доступные. В качестве электролита могут применяться растворы солей, что позволяет повысить температуру и скорость химического преобразования. Топливные элементы пока еще дороги, и поэтому применяются в основном там, где цена не играет решающей роли.

Использование теплоты продукции и отходов. В различных отраслях промышленности имеются резервы ВЭР в виде теплоты высокотемпературных технологических продуктов и отходов (например, шлаков металлургии). Эта теплота частично используется для регенеративного нагрева дутьевого воздуха. Так, в многотоннажном производстве цементного клинкера, извести, керамзита и других строительных материалов во вращающихся обжиговых печах непрерывно выдается сыпучий горячий продукт с температурой 800…1100 °С.

В последующем холодильнике в виде вращающегося барабана,



1 – барабанная вращающаяся печь; 2 – холодильник клинкера; 3 – очистка газов; 4 – подача сырья; 5 – горячий клинкер; 6 – охлажденный клинкер; 7 – холодный воздух; 8 – горячий воздух; 9 – топливо; 10 – уходящие газы.

Рисунок 12.4 - Схема теплоиспользования при обжиге клинкера

нагревается движущийся противоточно дутьевой воздух (рисунок 12.4).

Подобные схемы применяются также на предприятиях химической промышленности, в частности, при среднетемпературном (700…800 °С) обжиге серного колчедана на сернистый газ. Отходом в этом процессе является твердый огарок, состоящий в основном из оксидов железа.

В черной металлургии широко применяются установки сухого тушения кокса инертными газами, т. е. азотом с примесями углекислоты. Азот получается как отход производства кислорода, необходимого доменным и сталелитейным цехам металлургического комбината. Температура выдаваемого кокса составляет 1100…1150 °С, пригодная к использованию теплота килограмма топлива равна примерно 1 МДж, что эквивалентно возможной экономии условного топлива около 35 кг на тонну кокса. Один коксохимический завод выдает в год 5…6 млн т продукции, соответственно при использовании этого ВЭР экономия условного топлива составит 200…240 тыс. т. Установка состоит из тушильного бункера, змеевикового котла типа МПЦ, вырабатывающего до 20 т/ч пара давлением 4 МПа при 450 °С, и дымососа производительностью 60…70 тыс. $м^3$/ч. Раскаленный кокс подается с температурой около 1000 °С и охлаждается до 250 °С. Инертные газы противоточно нагреваются в тушильном бункере до 850 °С, направляются в паровой котел и охлаждаются в нем до 170 °С. При этом пару передается до 65 % теплоты кокса.

При сухом тушении кокса отсутствует водяной пар, который имеет место при мокром гашении и выбрасывается в армосферу. Пар содержит фенолы и вызывает коррозию металлоконструкций и загрязнение атмосферы.

Черная и цветная металлургия поставляет огромное количество жидких шлаков с температурой 1200…1500 °С. Потери теплоты со шлаками составляют до 30 % теплового баланса предприятия. Теплосодержание шлаков различного состава при температуре 1250 °С находится в пределах 1600…2200 кДж/кг, т. е. экономия условного топлива при утилизации этого ВЭР может составить 55…75 кг на тонну шлака.

Лекция №13. Биоэнергетика. Производство и использование биотоплива

Содержание лекции: биомасса, биотопливо и его характеристика, классификация энергетических процессов по переработке биомассы, производство и использование биотоплива, методы получения спирта и его использование, технология получения биогаза и конструкций биогазовых установок.

Цель лекции: изучение способов получения различных видов биотоплива и их использования.

Биомасса и ее источники. Биоэнергетика – энергетика, основанная на использовании биомассы как источник возобновляемой энергии**.**

То, из чего состоят растения и животные, принято называть *биомассой*. Биомасса образуется в процессе фотосинтеза – химической реакции, протекающей в растениях под воздействием солнечного излучения. В результате образуются органические вещества, которые используются в качестве пищи, для получения строительных материалов, тканей и многих других вещей. Среди всех многочисленных областей применения биомассы, необходимо отметить ее энергетическую ценность. *Основа биомассы* – органические соединения углерода, которые в процессе соединения с кислородом при сгорании или в результате естественного метаболизма выделяют *тепло.* Посредством химических или биохимических процессов *биомасса* может быть трансформирована в такие виды топлива, как *газообразный метан, жидкий метанол, твердый древесный уголь.* Их называют *биотопливом*.

Из общего количества биомассы только 0,5 % употребляется человечеством в виде пищи. Большой энергетический потенциал (ежегодно на Земле образуется около 120 млрд т сухого органического вещества, что эквивалентно 40 млрд т нефти.) и возобновляемый характер стимулируют развитие технологий получения энергии из биомассы. За счет отходов производства сахара в поставляющих его странах покрывается до 40 % потребностей в топливе. В странах ЕС доля энергии, получаемой из биомассы, достигает 55% от всей энергии, вырабатываемой с использованием возобновляемых энергоресурсов. Наиболее эффективно энергия биомассы используется в Португалии, Испании, Франции, Германии, Дании, Италии. Такие страны как Швеция и Австрия обеспечивают до 15% потребности в первичных энергоносителях за счет биомассы. Для многих развивающихся стран Азии и Африки биомасса сегодня является основным источником энергии. Применение биотоплива в виде дров, навоза и ботвы растений имеет первостепенное значение в домашнем хозяйстве примерно 50 % населения планеты, обеспечивая выработку в целом около 300 ГВт.

Выделяют следующие группы *источников биомассы:*

– древесина, древесные отходы, торф, листья и т.п.;

– отходы жизнедеятельности людей, включая производственную деятельность;

– отходы сельскохозяйственного производства (отходы растениеводства и животноводства);

– специально выращиваемые высокоурожайные агрокультуры.

Специальные энергетические фермы обеспечивают производство топлива в качестве основного или дополнительного продукта сельскохозяйственного производства (*поля*), лесоводства (леса), аквакультуры (*пресные и морские воды*), а кроме того, те виды промышленной и бытовой деятельности, в результате которых образуются органические отходы. Характерный пример - энергетические фермы по выращиванию и комплексной переработке сахарного тростника. При этом можно получить: патоки, химикаты, корма, этиловой спирт, строительные материалы, электроэнергия.

При использовании биомассы необходимо учитывать следующие:

- каждый вид производства биомассы способен дать широкий спектр разнообразных продуктов;

- при некоторых технологиях отдельные виды биотоплива, могут потребовать для своего производства больше энергии, чем смогут дать;

- производство биотоплива экономически оправдано только в том случае, если используются ритмично пополняемые запасы дешевого сырья, например, навоз скотных дворов, обрезки и опилки лесопилок, городские стоки, солому злаковых культур и т.п.;

- основные опасности экстенсивного использования топлива из биомассы – уничтожение лесов, эрозия почв, замена урожаев, идущих в пищу, «урожаями» топлива;

- биотоплива – это производные органических соединений, и всегда существует альтернатива использования последних в качестве химического сырья или конструкционных материалов. Например, пальмовое масло – один из компонентов мыла; из натурального сырья можно производить пластмассы и фармакологические препараты; композитные материалы на основе растительных волокон можно использовать в строительстве и т. д.

В качестве топлива *биомасса характеризуется*:

- *содержанием влаги и углерода*. Материал считается «сухим», если находится в длительном равновесии со средой, обычно при этом он содержит от 10 до 15 % влаги. Присутствие влаги в топливе из биомассы часто ведет к значительным потерям выхода тепловой энергии в связи с тем, что испарение воды требует 2,3 МДж/кг;

- *по уровню восстановления энергии.* Так, сахар (R=1) имеет теплоту сгорания около 450 кДж на 12 г углерода, содержащегося в нем. Полностью преобразуемый материал, например метан CH4 (R=2), имеет теплоту сгорания около 900 кДж на 12 г углерода (или на 16 г самого метана);

- *плотность биомассы*. Обычно сухие биологические материалы имеют плотность в 3…4 раза ниже, чем уголь. Энергетическая плотность биомассы

также значительно меньше, чем у угля и нефти. Доставка и переработка таких материалов из-за этого оказывается трудоемкой и дорогостоящей, если утилизация ведется вдали от источников производства биомассы.

В зависимости от разновидностей биомассы возможны различные технологии ее энергетического использования.

Классификация основных типов энергетических процессов, связанных с переработкой биомассы:

1) Термохимические процессы (при использовании сухой биомассы):

а) *прямое сжигание* для непосредственного получения тепла;

б) *пиролиз:* биомассу нагревают либо в отсутствие воздуха, либо за счет сгорания некоторой ее части при ограниченном доступе воздуха или кислорода. Состав получающихся при этом продуктов чрезвычайно разнообразен. Здесь и газы, и пары, и жидкости, и масла, и древесный уголь. Если основным продуктом пиролиза является *горючий газ,* то процесс называют *газификацией.*

2) Биомеханические процессы (при использовании жидкой или влажной биомассы):

а) с*пиртовая ферментация*. Получаемый при этом этиловый спирт– летучее жидкое топливо, которое можно использовать вместо бензина. Он вырабатывается микроорганизмами в процессе ферментации, обычно сахара;

б) *анаэробная переработка (сбраживание)*. В отсутствии кислорода некоторые микроорганизмы способны получать энергию, непосредственно перерабатывая углеродсодержащие составляющие, производя при этом CO_2 и CH_4 (метан). Смесь CO_2, CH_4 и попутных газов называется *биогазом;*

в) б*иофотолиз: фотолиз* – это разложение воды на водород и кислород под действием света. Некоторые биологические организмы продуцируют или могут при определенных условиях продуцировать водород путем биофотолиза.

3) Агрохимические процессы (экстракция топлив). В некоторых случаях жидкие или твердые разновидности топлива могут быть получены прямо от живых или только что срезанных растений. Сок живых растений собирают, надрезая кожуру стеблей или стволов, из свежесрезанных растений его выдавливают под прессом. Хорошо известный подобный процесс – получение каучука.

Развитие биоэнергетики имеет *как достоинства, так и недостатки*.

Основные достоинства: огромные потенциальные запасы и разнообразие культур; разнообразие применения; поощрение интегрированного сельскохозяйственного производства; эффективное использование побочных продуктов, отходов, стоков; улучшение состояния среды за счет утилизации отходов; ведет к развитию сельского хозяйства.

Основные недостатки: может привести к оскудению и эрозии почв; возможность конкуренции с производством пищи; крупномасштабная агроиндустрия может оказаться слишком сложной для эффективного управления; перевозка биомассы к перерабатывающим фабрикам создаст

перегрузку для транспорта; ошибки проектирования и отсутствие замкнутого цикла переработки могут привести к загрязнению среды.

Сжигание биотоплива для получения тепла. С помощью тепла сжигаемой биомассы:

- *приготовляют пищу, обогревают жилище*, почти половина населения планеты использует древесину и другие виды биотоплива для приготовления пищи и других домашних нужд;

- *сушка технических культур* (какао, кофе, чай, фрукты и т.п.);

- *сжигание отходов* – рациональный способ использования биотоплива, находящегося вблизи от места потребления энергии. Сжигание в эффективных печах позволяет получать потоки чистых горячих выхлопных газов при температуре около 1000 °С, которые могут быть приведены к требуемой температуре за счет подмешивания холодного воздуха;

- *производство тепла и электроэнергии*. Пар для обеспечения производства обычно получают, сжигая различные отходы биомассы в топках паровых котлов. В качестве примера рассмотрим ТЭЦ, работающую на биомассе с органическим циклом Ранкина (ОЦР), Адмонт. В 1999 г. установка комбинированного производства тепловой и электрической энергии (ТЭЦ) на биомассе с ОЦР была введена в эксплуатацию на деревообрабатывающем заводе «STIA» в Адмонте (Австрия). В качестве топлива используются опилки и древесные отходы, не подвергавшиеся химической обработке.

В последние годы для утилизации древесных отходов разработаны *специальные топочные устройства*, обеспечивающие высокие энергетические и экологические характеристики котлов. В частности, широко применяются *топки низкотемпературного кипящего слоя*, позволяющие сжигать биомассу влажностью 60 и более процентов. Для сжигания измельченных древесных и растительных отходов эффективны *вихревые топки*. Наиболее перспективным направлением развития технологии сжигания биомассы является *применение котлов с автоматической загрузкой топлива*. Такие котлы характеризуются значительно меньшими эксплуатационными расходами и более высокой энергоэффективностью.

Для автоматических котлов необходимо специальное дополнительное оборудование для подготовки топлива: *древесной щепы, гранул или брикетов* с определенной степенью влажности. В процессе переработки первичной биомассы топливо становится *более энергоемким и менее объемным.* Например, теплота сгорания древесных гранул – 17,5 МДж/кг, тогда как каменного угля – 15-25 МДж/кг.

Одной из самых перспективных технологий переработки древесных отходов сегодня является *изготовление топливных гранул – пеллет*.

Пеллеты – это нормированное цилиндрическое прессованное изделие из высушенной измельченной древесины. За счет высокого давления при прессовании гранулы не содержат химических закрепителей. Такой энергоноситель весьма эффективен и отвечает всем экологическим

требованиям, а работающие на нем автоматизированные котлы позволяют строить достаточно дешевые пароэлектростанции.

Пиролиз, являющийся более совершенной технологией энергетического использования биомассы, представляет собой процесс термохимической обработки биомассы без доступа кислорода при относительно низких температурах – от 300 до 800^{o} С. В результате удаления летучей фракции получается *древесный уголь*, который имеет энергетическую плотность в два раза большую, чем исходный материал при более высокой температуре сгорания. Он используется в качестве топлива, а также как сырье в металлургической, электроугольной, фармакологической промышленности.

Жидкие и газообразные продукты пиролиза являются, в свою очередь, ценными энергоносителями. *Метан* может использоваться для производства электроэнергии с помощью газодизельных или газотурбинных электростанций. Выход газообразного топлива может достигать 70% массы сухого сырья при высокотемпературном быстром пиролизе.

Жидкие продукты пиролиза также могут использоваться как жидкое топливо с теплотой сгорания 20–25 МДж/кГ. Выход *пиротоплива* может достигать 80% массы сухого сырья при быстром низкотемпературном пиролизе. Он может использоваться в качестве котельного топлива, а также может быть применен в газовых турбинах и дизельных двигателях.

Использование биомассы через преобразование ее в пиротопливо имеет ряд преимуществ: более низкие транспортные затраты на биотопливо по сравнению с исходным сырьем; процесс пиролиза энергетически независим, так как позволяет использовать твердые и газообразные продукты для получения тепла, необходимого для самого процесса и сушки биомассы; возможность хранения пиротоплива и эффективного его использования в существующих котлах; низкий уровень выбросов загрязняющих веществ по сравнению с прямым сжиганием биомассы.

Факторы, ограничивающие практическое использование пиролиза: критичность к влажности исходного сырья, что требует его предварительной сушки; критичность к размерам частиц биомассы, что требует применения специального оборудования; необходимость кислотной промывки исходного сырья, для увеличения выхода жидкого топлива; высокие теплотехнические требования к реактору; ограниченный выбор серийного оборудования для технологии пиролиза на сегодняшний день.

Газофикация биомассы. Технология газификации биомассы основана на сжигании древесины в условиях отсутствия или недостатка кислорода. Под воздействием тепла разрываются химические связи в молекулах сложных углеводородов, содержащихся в древесине. В результате чего *образуются метан, метиловый газ, водород, углекислый и угарный газы, древесный спирт, углерод, вода и многие малые добавки.* Количество метана может доходить до 25%. *Метан* имеет высокую теплотворную способность и может использоваться вместо природного газа. *Метиловый газ* может сжигаться непосредственно или после

превращения в *метанол*, который представляет собой высококачественное синтетическое жидкое топливо, пригодное для использования в двигателях внутреннего сгорания.

Во время мировой войны, когда около миллиона автомобилей приводились в движение с помощью газификаторов на биомассе.

К основным преимуществам газификации относятся: высокий энергетический КПД, достигающий 95%; электростанции с установками газификации биомассы имеют КПД в 2 раза выше, чем паровые; древесина полностью превращается в газ и золу, используемую как улучшитель почвы; установки для сушки щепы используют тепло выхлопных газов генерирующего модуля; являясь фильтром для очистки выхлопных газов, газогенераторные электростанции обладают хорошими экологическими характеристиками; полученное биотопливо не приводит к возрастанию CO_2 и SO_2 в атмосфере, увеличению парникового эффекта.

Газогенераторные электростанции на древесных отходах единичной мощностью от 10 до 600 кВт используют технологию газификации измельченных отходов с влажностью менее 20%. Для выработки электроэнергии полученный газ используется в качестве топлива в одном или нескольких модулях генерации на базе газодизельных двигателей, работающих на смеси генераторного газа (70–85%) и обычного дизельного топлива (15–30%), или на базе газовых двигателей, работающих на 100%-ом генераторном газе (рисунок 13.1).

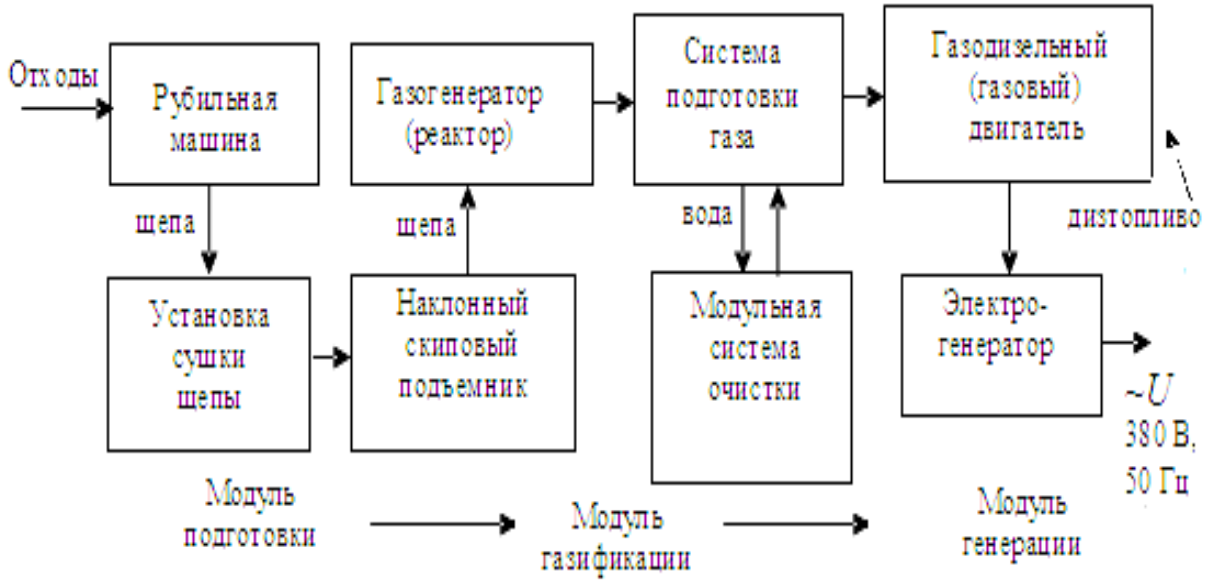


Рисунок 13.1- Общая структура газогенераторной электростанции

Спиртовая ферментация (брожение). Получение биоэтанола. Этиловый спирт (этанол) C_2H_5OH в естественных условиях образуется из сахаров соответствующими микроорганизмами в кислой среде, pH – от 4 до 5. Подобный процесс спиртовой ферментации во всем мире используют для получения питьевого спирта. Наиболее часто используемые микроорганизмы

– дрожжи вида Saccharomyces cerevisiae – погибают при концентрации спирта выше 10 %, поэтому для повышения концентрации спирта используют *перегонку или фракционирование*. После перегонки получается кипящая при постоянной температуре смесь: 95 % этанола и 5 % воды.

В качестве сырья могут использоваться многие доступные растительные культуры: сахарный тростник, сахарная свекла, картофель, растительный крахмал, кукуруза, целлюлоза и др.

Биоэтанол является спиртовым топливом, которое может использоваться в двигателях внутреннего сгорания либо в чистом виде, либо в качестве добавки к бензину. Можно вводить в несколько переделанные бензиновые двигатели прямо 95%-й этанол, а можно подавать в обычный двигатель смесь из 100%-го этанола (обезвоженный) с бензином в соотношении 1:10. В другом варианте смешивают бензин с обезвоженным этанолом (20 % по объему) и используют эту смесь (*газохол)* в обычных бензиновых двигателях. *Газохол* в настоящее время – обычное топливо в Бразилии, используют его и в США.

Важная особенность этанола – способность выдерживать ударные нагрузки без взрыва, из-за этого он гораздо предпочтительнее добавок из тетраэтилсвинца, вызывающего серьезные загрязнения атмосферы. Превосходные свойства этанола как горючего обеспечивают двигателям 20%-е увеличение мощности по сравнению с чистым бензином.

Бразилия, в которой более 600 заводов, производят 16,5 миллиардов литров этанола в год. За четверть века производство этанола в мире выросло в 8 раз. Обычно при благоприятных обстоятельствах цена этанола в качестве топлива может быть сравнима с ценой бензина.

Биодизель – это эфиры растительных масел или животных жиров, получаемых в результате химической реакции масла или жира с метиловым или этиловым спиртом.

Технология получения биодизеля довольно проста и доступна в условиях любого предприятия или фермерского хозяйства. Основным сырьем для его производства в Европе является рапс, в США и Южной Америке – соя. Любое растительное масло может служить исходным сырьем для получения биотоплива, которое получается при замещении в масле глицерина на спирт. Из одной тонны растительного масла и 111 кг спирта (в присутствии 12 кг катализатора) получается 970 кг (1100 л) биодизеля и 153 кг первичного глицерина.

Лекция №14. Производство и использование биогаза. Экологические аспекты использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии

Содержание лекции: производство и использование биогаза, экологические последствия развития солнечной энергетики, ветроэнергетики,

гидроэнергетики, геотермальной энергетики и использования биоэнергетических установок, энергии морских и океанских вод.

Цель лекции: изучить технологию и установку для получения биогаза, показать экологические последствия использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Технология получения биогаза и биогазогенераторные установки. В естественных условиях разрушение любых видов биомассы, и в том числе навоза в почвенном гумусе путем разложения на элементарные соединения под действием разлагающих организмов, грибов, бактерий. Для этого процесса животных, происходит предпочтительны *сырость, тепло и отсутствие света.* На конечной стадии процесса полное разложение происходит под действием множества бактерий, классифицируемых либо как *аэробные*, либо как *анаэробные. Аэробные бактерии* развиваются преимущественно *в присутствии кислорода*, с их участием углерод биомассы окисляется до углекислого газа (CO_2), т.е. имеет место выделение (CO_2).

В замкнутых объемах с недостаточным поступлением кислорода из внешней среды развиваются *анаэробные бактерии*, также существующие за счет разложения углеводов. Совершаемые микроорганизмами реакции разложения биомассы также относятся к процессам ферментации, однако для процессов, идущих в анаэробных условиях, чаше предпочитают термин *«брожение»*. В конечном итоге за счет их деятельности углерод делится между полностью окисленным CO_2 и полностью восстановленным метаном (CH_4). Питательные вещества, такие как растворимые соединения азота, сохраняются в качестве удобрений почвенного гумуса.

Биогаз – смесь метана и углекислого газа, получаемый в процессе брожения биомассы, образуется в герметичных специальных устройствах – биогазогенераторах, устроенных и управляемых таким образом, чтобы обеспечить максимальное выделение метана.

Энергия, получаемая при сжигании биогаза, может достигать от 60 до 90 % исходной, которой обладает сухой исходный материал. Однако газ получают из жидкой массы, содержащей 95 % воды, так что на практике выход достаточно трудно определить.

Другое очень важное достоинство процесса *анаэробного брожения* в том, что в его отходах содержится *значительно меньше болезнетворных организмов,* чем в исходном материале.

Получение биогаза становится *экономически оправданным* и предпочтительным, когда соответствующий биогазогенератор работает на переработке существующего потока отходов. Оно особенно эффективно на агропромышленных комплексах, где целесообразно добиваться реализации полного экологического цикла. Там навоз подвергают анаэробному сбраживанию с последующей аэробной обработкой в открытых бассейнах.

Биогаз используют для освещения, приведения в действие механизмов, транспорта, электрогенераторов, для обогрева. В бассейнах

можно выращивать водоросли, идущие на корм скоту.

Основные процессы и энергетика технологии получения биогаза. Обычно отходы животноводства сбраживают примерно 60 % исходного продукта. Выход газа составляет примерно от 0,2 до 0,4 $м^3$ на 1 кг сбраживаемого сухого материала при нормальных условиях и при расходе 5 кг сухой биомассы на 1 м воды.

Существуют три характерных уровня температур, предпочтительных для определенных видов бактерий.

Сбраживание при более высоких температурах идет быстрее, чем при низких, и характеризуется примерно удвоением выхода газа на каждые 5 °С.

Низший уровень температуры – *психрофильный,* около 20 °С, средний – *мезофильный*, около 30…35 °С, высший – *термофильный*, около 55 °С.

В теплых тропиках сбраживание идет без подогрева при температуре почвы в пределах 20…30 °С, сбраживание соответствует психрофильному с временным интервалом 14 дней.

В странах с более холодным климатом среду для сбраживания следует подогревать, используя часть получающегося биогаза или электронагрев, до температуры примерно 35 °С. Некоторые бактерии «работают» при 55 °С, что ускоряет разложение материала, но не увеличивает количество биогаза.

Биохимические процессы при сбраживании идут в три стадии, причем каждая обеспечивается собственной группой анаэробных бактерий.

1) Нерастворимые разлагаемые биологически материалы (напри-мер, целлюлоза, полисахариды, жиры) расщепляются на углеводы и жирные кислоты. Это происходит при температуре 25 °С за сутки.

2) Кислотопродуцирующие бактерии образуют преимущественно уксусную и пропионовую кислоты. Эта стадия также идет сутки.

3) Бактерии, образующие метан, в течение примерно 14 суток, при 25 °С полностью сбраживают исходные продукты, вырабатывая 60-70 % CH_4 и 30-40 % CO_2 с малыми примесями водорода (H_2) и сероводорода (H_2S).

Метанообразующие бактерии чувствительны к величине pH: условия в среде должны быть среднекислыми (pH от 6,6 до 7,0) и, конечно, не ниже pH = 6,2. Требуется определенное содержание азота и фосфора: около 10 и 2 % массы сухого сбраживаемого материала соответственно.

Золотое правило успешного сбраживания – *поддерживать постоянные условия по температуре и подаче исходных материалов.*

Реальные биогазогенераторы и принципы их работы:

1) Домашний блок для тропиков. Наиболее простое устройство, состоящее из двух металлических емкостей, верхняя из которых служит газгольдером, в нижнюю периодически загружается сбраживаемый навоз с добавкой культуры анаэробных бактерий из действующего генератора. Биогаз из газгольдера по трубопроводу подается в дом и используется по необходимости. Подобные Системы, этой, ненадежны, используют их недолго, пока есть энтузиазм.

2) Китайский биогазогенератор. Главная особенность –

стационарный сводчатый корпус из бетона, который значительно дешевле системы с тяжелым плавучим металлическим газгольдером. По мере выделения газа его объем увеличивается, за счет соответствующего роста давления поток сбраживаемой массы прерывается. Этим достигается регулирование работы.

3) Установка для промышленной переработки отходов животноводства. Автоматизированная установка, в которой процесс сбраживания идет при подогреве по крайней мере до 35 °С.

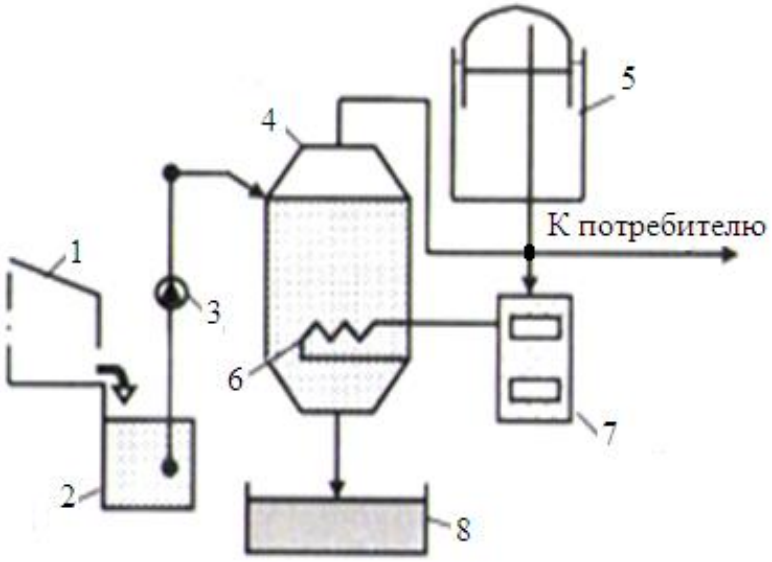
На рисунке 14.1 показана технологическая схема биогазовой установки. Основные элементы биогазовых установок:

а) биореактор – это герметически закрытая емкость, в которой осуществляется метановое брожение органического вещества биоотходов;

б) газгольдер - это хранилище биогаза, которое представляет собой цилиндрическую или сферическую емкость, его объем определяется условиями поступления и потребления газа;

в) теплообменник позволяет поддерживать рабочую температуру субстрата в биореакторе и компенсировать тепловые потери;

г) перемешивающие устройства, которые во всех случаях включаются в работу периодически и обеспечивают высвобождение образующего биогаза, перемешивание свежего субстрата и популяций бактерий, равномерное распределение температуры в объеме реактора.



1- ферма; 2- навозоприемник; 3- фекальный насос; 4 – биореактор; 5- газгольдер; 6- теплообменник; 7- топливный котел; 8 – хранилище удобрения.

Рисунок 14.1 - Технологическая схема биогазовой установки

Органические отходы поступают в специальный накопитель 2, где их разбавляют водой. В случае необходимости для создания нужного соотношения углеводорода и азота в резервуар добавляют отходы полеводства. Подготовленный субстрат подается насосом 3 в биореактор 4, в котором происходит процесс анаэробного сбраживания. Образующийся

биогаз поступает в газгольдер 5, а удобрение подается в хранилище 8.

Применение биогазовой установки позволит повысить эффективность производства и снизить себестоимость продукции животноводства, увеличить выработку экологически чистых удобрений, обеспечить соблюдение санитарных и экологических требований к фермам.

Взаимодействия энергетики и экологии. Возобновляемые источники энергии всё шире применяются в энергетике и поэтому всё пристальнее внимание к аспекту их взаимодействия с окружающей средой. Первой дала знать о проблеме "большая" гидроэнергетика. При воздвижении на реках циклопических плотин и создании озер-водохранилищ страдает население, сельское и рыбное хозяйство, речная навигация и т.д.

При возведении Асуанской ГЭС в Египте в зону затопления попадал древний времен фараонов храм Абу - Симбел. Его вырубили из скалы и частями перенесли повыше.

Вообще, у каждого вида ВИЭ найдутся «свои» проблемы с Природой. *Возобновляемая энергетика не совсем «чистая»,* но острота создаваемых ею проблем на порядки ниже создаваемых топливной и ядерной энергетикой. *Однако, возможные экологические последствия применения ВИЭ должны быть исследованы заранее,* т.к. определенные виды экологического воздействия ВИЭ на окружающую среду не ясны до настоящего времени.

Преобразование энергии ВИЭ в электричество или тепло на уровне современных знаний и технологий обходится довольно дорого. Однако во всех случаях их использование приводит *к снижению расходов органического топлива и меньшему загрязнению окружающей среды*.

Отметим, что общим для всех ВИЭ является *низкая концентрация* энергии, что требует вовлечения бóльших площадей, объёмов, масс в процесс.

Экологические последствия развития солнечной энергетики.

Серьёзных претензий *к солнечным водонагревательным и отопительным установкам* у экологов нет, к тому же они маломасштабны. Могут быть проблемы при вытекании антифризов из 2-х, 3-х контурных систем. Касательно солнечных электростанций (СЭС), централей (СЭЦ) и солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС), то условно экологически чистой можно назвать лишь их эксплуатацию.

Солнечные электростанции (СЭС) и централи (СЭЦ) работают с концентраторами солнечной энергии, *занимающими громадные площади*, то же касается и фотоэлектрических станций (СФЭС). *Удельная землеемкость* СЭС изменяется от 0,001 до 0,006 га/кВт с наиболее вероятными значениями 0,003–0,004 га/кВт. Это меньше, чем для ГЭС, но больше, чем для ТЭС и АЭС. Например, СЭС башенного типа PS20 (Испания) установленной мощностью 20 МВт занимает площадь 9000 га, на которой установлены 1255 гелиостатов общей поверхностью 151000 м^2. Эта земля выведена из оборота.

В изготовлении фотоэлектрических панелей используется кремний «солнечного» качества. *Производство кремния экологически вредно*. В мире

разрабатываются бесхлорные технологии его получения взамен «хлорных», так что эта проблема разрешима.

Ещё, «*большая» солнечная энергетика весьма материалоемка* (металлы, стекло, бетон и т.д.). Солнечные панели и концентраторы создают большие по площади затенения, что приводит к деградации почв. Нагрев воздуха над гелиостатами приводит к созданию местного микроклимата: изменяется тепловой баланс, направление ветра, влажность, в районе расположения станции. Экологическую угрозу представляет также применение в гелиосистемах низкокипящих жидкостей (особенно хроматов и нитритов), являющихся высокотоксичными веществами, риск утечек не исключен, что приводит к загрязнению подземных вод.

Влияние ветроэнергетики на природную среду.

Малые ветроэнергетические установки (ВЭУ до 1МВт) «безобидны» для Природы. *Основными отрицательными воздействиями крупных ВЭУ* на среду обитания человека является *аэродинамический шум и угроза гибели птиц. Шум* у основания башни мощных ВЭУ составляет 95-100 дБ, что сопоставимо с грохотом пневматического перфоратора, поэтому представители фауны избегают таких мест. Однако, уже на расстоянии 200 м он равен шуму холодильника на кухне.

Угроза гибели перелетных птиц от столкновения с ветроустановками существует, но она устраняется, если площадки для ветростанций будут выбираться после орнитологической экспертизы. По мнению Американской ветроэнергетической ассоциации, при интенсивном развитии ветроэнергетики гибель птиц от столкновения с ВЭУ не превысит 1% от таких случаев в результате человеческой деятельности: охота, домашние звери, пестициды, линии электропередач, высотные здания и т.д.

Как и для СЭС *под мощные промышленные ВЭС необходимы большие площади* из расчета от 0,06 до 0,2 км^2/ МВт в зависимости рельефа местности и розы ветров. ВЭС мощностью 1000 МВт потребуется площадь от 60 до 200 км^2. Выделение таких площадей в густонаселённых промышленных регионах сопряжено с большими трудностями, хотя частично эти земли могут использоваться и под хозяйственные нужды. Территориальные проблемы снимаются при создании оффшорных ВЭС на мелководьях, но возникают “акваториальные”: влияние шума на морскую фауну, помехи рыболовству, судоходству и, опять таки, потребность в больших, теперь уже, акваториях.

Мощные ВЭС могут влиять на движение воздуха в районе размещения и экранирующий эффект может оказаться эквивалентным действию возвышенности такой же площади и высотой порядка 100-150 м.

Помехи, вызванные отражением электромагнитных волн лопастями ветровых турбин, могут сказываться на качестве телевизионных и микроволновых радиопередач, а также различных навигационных систем в районе размещения парка ВЭС на расстоянии нескольких километров. Эти вопросы разрешимы чисто технически.

Кроме рассмотренных проблем надо упомянуть:

- мощные ВЭУ, имея высоту 60-80 и более метров, «вторгаются» в ландшафт и *могут испортить «пейзаж»,* возникает некая несовместимость с окрестностями, *зрительный дискомфорт*, визуальное неприятие. Это уже «поле» деятельности для ландшафтных дизайнеров. Например, трехлопастные ВЭУ «приятнее» для глаза чем двух- и, тем паче, однолопастные;

- при авариях крупных ВЭУ (никто от них не застрахован) оторвавшаяся лопасть ветрового колеса может быть отброшена на 400–800 м, что чревато негативными последствиями.

Экология биоэнергетических установок. В целом *биотехнологии «дружат» с Природой.* Риск экологических последствий возникает при прямых изменениях в землепользовании, когда производство биосырья меняет существующий уклад, результатом чего является изменение баланса углерода в почве и над ней, нарушение режимов водопользования, обеднение почвенной органики, истощение и эрозия почв, особенно, под энергетическими плантациями.

Биоэнергетические установки по сравнению с другими ВИЭ-агрегатами являются наиболее экологически безопасными. Более того, они способствуют избавлению окружающей среды от загрязнения всевозможными отходами. Так, например, анаэробная ферментация – не только эффективное средство *утилизации отходов* животноводства, но и обеспечения экологической чистоты, так как твердая «органика» теряет запах и становится менее привлекательной для грызунов и насекомых, в процессе сбраживания *погибают болезнетворные микроорганизмы* и образуются *ценные удобрения*. То же относится к городским стокам и твердым отходам, отходам лесного хозяйства и деревообработки. Поэтому развитие биоэнергетики эффективно и в экологическом отношении.

Однако при «прямом» использовании биомассы *для получения теплоты* имеют место *неблагоприятные воздействия на Природу*. Сжигание древесины дает большое количество твердых частиц, органических компонентов, окиси углерода, канцерогенов и токсичных веществ, изменяется тепловой баланс атмосферы. По сравнению с древесиной биогаз – более чистое топливо. Вместе с тем при производстве и потреблении биогаза необходимы меры предосторожности, так как метан взрывоопасен.

В процессах по переработке биомассы в этанол образуется большое количество побочных продуктов (промывочные воды и остатки перегонки), являющихся серьезным источником загрязнения среды, поскольку их масса в несколько раз (до 10) превышает выход этилового спирта.

Кроме экологического существует и социальный аспект. Спрос на биотопливо является одним из стимулов роста производства биоматериала в сельском хозяйстве, что ведет к снижению производства продовольствия и росту цен на него. Это уже чревато недовольством населения.

Экологические аспекты геотермальной энергетики. Как правило, при «мягкой» эксплуатации геотермального месторождения, скважины, без

грубого вмешательства в глубинные подземные процессы, ущерб Природе минимальный. Пример: Рейкьявик - столица Исландии отапливается термальными водами в полной гармонии с «окружающей средой».

Основное негативное воздействие на Природу геотермальные установки оказывают в период разработки месторождения, строительства водо-паропропроводов и зданий, но оно обычно ограничено ареалом месторождения. Одно из неблагоприятных проявлений – *загрязнение поверхностных и грунтовых вод* в случае выброса растворов высокой концентрации при бурении скважин.

Экологические и социальные последствия, связанные с геотермальной энергией, как правило, зависят от конкретного места и конкретной технологии. По большей части их можно устранить или смягчить и минимизировать негативные экологические воздействия.

Серьезной проблемой может стать необходимость *отчуждения больших земельных площадей*. К примеру, в Долине гейзеров (США) дебит каждой скважины обеспечивает в среднем 7 МВт полезной мощности. Для работы станции мощностью 1000 МВт требуется 150 скважин, которые занимают территорию более 19 км^2.

Потенциальными последствиями геотермальных разработок являются *оседание почвы и сейсмические эффекты*. Происходит *снижение дебитов* термальных источников и гейзеров. Так, при эксплуатации месторождения Вайрокей (США) с 1954 по 1970 гг. поверхность земли просела почти на 4 м, а площадь зоны, на которой произошло оседание грунта, составила около 70 км^2, продолжая ежегодно увеличиваться.

Высокая сейсмическая активность является одним из признаков близости геотермальных месторождений, и он используется в поисках ресурсов.

На ГеоТЭС не происходит сжигания топлива, поэтому объем токсичных газов, выбрасываемых в атмосферу, значительно меньше, чем на ТЭС, и они имеют другой химический состав. В водяном паре, добываемом из геотермальных скважин часто *содержатся газовые примеси*, состоящие на 80 % из двуокиси углерода и содержащие небольшие доли метана, водорода, азота, аммиака и сероводорода. Как видно, $C0_2$ является основным парниковым газом при выбросах из геотермальных источников. Прямые выбросы $C0_2$, при этом лежат в пределах от 4 до 740 грамм на 1 кВт·ч произведенной энергии.

Потребность ГеоТЭС в охлаждающей воде (на 1 кВт·ч электроэнергии) в 4-5 раз выше, чем ТЭС, из-за более низкого КПД. В ранних проектах отработанная геотермальная вода сбрасывалась в ближайший водоём и, если она содержала различные соли, в том числе и тяжелых металлов, происходило, кроме *теплового и химическое загрязнение водоёмов*. Проблема снята обратной закачкой отработанной воды в пласт. Современные проекты геотермальных установок в обязательном порядке содержат обратную закачку. Картина в целом благостная. Однако *применение технологии с*

гидроразрывом пласта зачастую приводит к порче подземных вод, просадкам грунта и может спровоцировать землетрясения.

Кроме рассмотренных возможны *другие негативные проявления*:

− изменение уровня грунтовых вод, заболачивание;

− выброс отравленных вод и конденсата, загрязненных в небольших количествах аммиаком, ртутью, кремнеземом;

− загрязнение подземных вод и водоносных слоев, засоление почв;

− выбросы больших количеств рассолов при разрыве трубопроводов.

Экологические последствия использования энергии морских и океанских вод. Деятельность при освоении любых видов энергии морских-океанских вод неминуемо сопровождается изменением естественного состояния затрагиваемых экосистем.

При эксплуатации океанических ТЭС (ОТЭС) использующих тепловой градиент вод *возможны утечки аммиака, пропана или фреона*, т.к. эти агенты применяются в работе тепловых насосов, а также веществ, применяемых для промывки теплообменников (хлор и др.). Возможно *значительное выделение углекислого газа* (CO_2) из поднимаемых на поверхность холодных глубинных вод из-за снижения в них парциального давления CO_2 и повышения температуры, Выделение CO_2 из воды при работе океанических ТЭС предположительно на 30% больше, чем при работе обычных ТЭС той же мощности, использующих органическое топливо. Охлаждение вод океана вызывает увеличение содержания питательных веществ в поверхностном слое и значительный рост фитопланктона. При подъеме к поверхности *глубинные микроорганизмы будут загрязнять океан* и придется применять специальные меры для его очистки.

Работа приливных электростанций (ПЭС) неблагоприятно сказывается на состоянии прибрежных земель, самого побережья и аквальной вдольбереговой полосы: изменяются условия подтопления, засоления, размыва берегов, формирования пляжей и т. д. Изменение движения грунтовых вод влияет на динамику засоления прибрежных земель.

Использование механической энергии волн на глубоководных местах в открытом океане сказывается на процессах в акватории океана. Преобразователи, размещаемые далеко от берега не оказывают отрицательного действия на устойчивость побережья.

При установке преобразователей вблизи побережья *возникают проблемы эстетического характера*, так как они видны с берега. Цепочка устройств типа ныряющих уток Солтера длиной в несколько километров выглядит эстетически менее привлекательно, чем группа продуманно размещенных отдельно стоящих преобразователей энергии. Кроме того, непрерывная линия преобразователей в отличие от отдельно расположенных установок может стать *препятствием для навигации* и оказаться опасной для судов во время сильных штормов.

Один из важных вопросов влияния на окружающую среду преобразователей энергии волн в прибрежной зоне – это ее стабильность,

баланс между эрозией и отложениями. В связи с этим цепь из уток Солтера целесообразно устанавливать в местах намечаемых волноломов, чтобы они выполняли двойную функцию: использование энергии волн и защиту побережья.

Неблагоприятные экологические последствия в *гидротермальной энергетике:*

− утечки в океан аммиака, фреона, хлора и др.;

− выделение CO2 из воды;

− изменение циркуляции вод, появление региональных и биологических аномалий под воздействием гидродинамических и тепловых возмущений;

− изменение климата.

Неблагоприятные экологические последствия в *приливной энергетике:*

− периодическое затопление прибрежных территорий, изменение землепользования в районе ПЭС, флоры и фауны акватории;

− строительное замутнение воды, поверхностные сбросы загрязненных вод.

Неблагоприятные экологические последствия в *волновой энергетике:*

− эрозия побережья, нарушения движения прибрежных песков;

− значительная материалоемкость;

− изменение сложившихся судоходных путей вдоль берегов;

− загрязнение воды в процессе строительства, поверхностные сбросы.

Неблагоприятные экологические последствия в *энергетике течений энергетике:* травмирование и гибель морских зверей и рыб; миграция рыб-пути; возможные утечки при ТО и авариях; нарушения судоходства; неизбежные нарушения при строительстве.

Оценка эффективности ВИЭ в охранении Природы. К настоящему времени накоплены сведения, позволяющие произвести количественную оценку уменьшения выбросов в атмосферу и сокращения потребления водных ресурсов с использованием ВИЭ-технологий.

Установлено, что выработка 1 млн кВт·ч электроэнергии на солнечных, ветровых, геотермальных и гидравлических станциях предотвращает вредные выбросы при производстве того же количества энергии на угольных ТЭС в следующих количествах: углекислого газа - 750-1250 т; двуокиси серы - 5-8 т; окислов азота - 3-6 т; золы - 40-70 т; пыли - 270-470 кг.

Отметим, что ценность Воды, как ресурса растет во всем Мире и Казахстан не исключение. Производство электрической и тепловой энергии топливными и атомными электростанциями требует значительных объемов воды для охлаждения конденсаторов в термодинамических циклах. Для угольных электростанций вода используется также для очистки и обработки топлива. С другой стороны, при эксплуатации ветро- и фотоэлектрических станций используется лишь небольшое количество воды для промывки лопастей ветроколёс и очистки фотопанелей. Потребление воды ВЭС, например, в 475 раз меньше чем на АЭС, в 400 раз меньше, чем на угольных станциях и в 275 раз меньше, чем на газовых ТЭС.

Лекция №15. Энергосбережение. Энергетический аудит

Содержание лекции: энергосбережение и способы экономии электроэнергии и тепловой энергии, воды и газа, понятие о энергоаудите**,** основные этапы и методология энергоаудита.

Цель лекции: ознакомление студентов с основными способами энергосбережения и основными понятиями**,** этапами и методологией энергетического аудита.

Энергосбережение и способы экономии энергетических ресурсов.

Энергосбережение – реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное расходование) топливно-энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов. Энергосбережение – важная задача по сохранению природных ресурсов.

Препятствием к его осуществлению является сдерживание роста тарифов для населения на отдельные виды ресурсов (электроэнергия, газ), отсутствие средств у предприятий на реализацию энергосберегающих программ, низкая доля расчетов по индивидуальным приборам учёта и применение нормативов, а также отсутствие массовой бытовой культуры энергосбережения.

Экономия электрической энергии.

Ключевыми мероприятиями оптимизации потребления электроэнергии *на освещение* являются:

- максимальное использование дневного света (повышение прозрачности и увеличение площади окон, дополнительные окна);
- повышение отражающей способности (белые стены и потолок);
- оптимальное размещение световых источников (местное освещение, направленное освещение);
- использование осветительных приборов только по необходимости;
- повышение светоотдачи существующих источников (замена люстр, плафонов, удаление грязи с плафонов, применение более эффективных отражателей);
- замена ламп накаливания на энергосберегающие (люминесцентные, компактные люминесцентные, светодиодные);
- применение устройств управления освещением (датчики движения и акустические датчики, датчики освещенности, таймеры, системы дистанционного управления);
- внедрение автоматизированной системы диспетчерского управления наружным освещением (АСДУ НО);
- установка интеллектуальных распределённых систем управления освещением (минимизирующих затраты на электроэнергию).

Основными мероприятиями являются по энергосбережению *в электроприводе:*

- оптимальный подбор мощности электродвигателя;
- использование частотно-регулируемого привода (ЧРП).

Основные мероприятия по энергосбережению при использовании *электрообогрева и электроплит*:

- подбор оптимальной мощности электрообогревательных устройств;
- оптимальное размещение устройств электрообогрева для снижения времени и требуемой мощности их использования;
- повышение теплообмена, в том числе очистка от грязи поверхностей устройств электрообогрева и конфорок электроплит;
- местный (локальный) обогрев, в том числе переносными масляными обогревателями, направленный обогрев рефлекторами;
- использование масляных обогревателей с вентилятором для ускорения теплообмена в квартире;
- использование устройств регулировки температуры, в том числе устройств автоматического включения и отключения, снижения мощности в зависимости от температуры, временных таймеров;
- использование тепловых аккумуляторов;
- замена электрообогрева на обогрев с использованием тепловыми насосами;
- замена электрообогрева на обогрев газом или подключение к централизованному отоплению;
- использование посуды с широким плоским дном.

Основными способами энергосбережения при использовании *холодильных установок и бытовых холодильников* являются:

- оптимальный подбор мощности холодильной установки;
- качественная изоляция корпуса (стенок), двери холодильной установки, холодильника, прозрачная крышка в холодильнике для продуктов, с качественной изоляцией;
- приобретение современных энергосберегающих холодильников;
- не допускать образования наледи, инея в холодильнике, вовремя размораживать, материалы и продукты рекомендуется помещать в холодильник после охлаждения на воздухе;
- качественный отвод тепла - не рекомендуется ставить бытовой холодильник к батарее или рядом с газовой плитой.

При использовании кондиционеров:

- необходимо корректно подбирать мощность и место установки кондиционера, исходя из объема помещения, количества людей;
- при кондиционировании окна и двери должны быть закрыты - иначе кондиционер будет охлаждать улицу или коридор;
- чистить фильтр, не допускать его сильного загрязнения;
- необходимо настроить режим автоматического поддержания оптимальной температуры, не охлаждая комнату ниже 20-22 градусов;

- необходимо следить за тем, чтобы отключать кондиционер на ночь.

При использовании бытовых и прочих устройств:

- пользуйтесь энергосберегающим «спящим» режимом прибора;

- при выборе новой аудио-, видео-, компьютерной- и др. техники отдавайте предпочтение устройству с меньшим энергопотреблением как в рабочем режиме, так и в дежурном режиме;

- замените приборы, имеющие в своем составе трансформаторные блоки питания, на аналогичные с импульсными блоками питания;

- не наливайте полный чайник, если нужен кипяток для одной чашки;

- не оставляйте без необходимости включенными в сеть зарядное устройства для мобильных приборов;

- старайтесь избегать использования удлинителей, а если это необходимо, то пользуйтесь качественными удлинителями с проводом большого сечения.

Для снижения потерь в сети необходимо:

- использование энергосберегающих устройств;

- увеличение значений номиналов проводников - проводов и кабелей;

- использование только проводов и кабелей с медной жилой;

- отслеживание несанкционированных подключений.

Экономия тепловой энергии. Для снижения теплопотерь необходимо:

- использование теплосберегающих материалов при строительстве;

- установка теплосберегающих оконных конструкций и дверей.

Мероприятия по повышению эффективности систем теплоснабжения предусматривают следующие направления оптимизации:

1) Со стороны источника:

- повышение эффективности источников теплоты за счет снижения затрат на собственные нужды;

- использование современного теплогенерирующего оборудования, такого, как конденсационные котлы и тепловые насосы;

- использование узлов учёта тепловой энергии.

2) Со стороны тепловых сетей:

- снижение тепловых потерь в окружающую среду;

- оптимизация гидравлических режимов тепловых сетей;

- использование современных теплоизоляционных материалов;

- использование антивандальных покрытий при наружной прокладке тепловых сетей;

- снижение утечек и несанкционированных сливов теплоносителя из трубопроводов.

3) Со стороны потребителей:

- снижение теплопотерь через наружные ограждающие конструкции;

- использование вторичных энергоресурсов;

- использование систем местного регулирования отопительных приборов для исключения перетопа;

- перевод зданий в режим нулевого потребления теплоты на отопление, при этом поддержание параметров воздуха в здании должно происходить за счет внутренних выделений теплоты и улучшения тепловой изоляции;

- использование узлов учёта тепловой энергии.

Основные мероприятия по экономии воды:

- установка приборов учёта потребления воды;

- использование воды, только когда это действительно необходимо;

- установка сливных унитазных бачков, имеющих выбор интенсивности;

- установка автоматических регуляторов расхода воды, аэраторов с регуляторами 6 л\мин для крана и регуляторов 10 л\мин для душа.

Основные мероприятия по экономии газа:

- подбор оптимальной мощности газового котла и насоса;

- утепление помещений, оптимальный подбор эффективных радиаторов отопления в помещениях, где используется обогрев газовым котлом;

- использование на газовых плитах посуды с широким плоским дном, закрывающейся крышкой, желательно прозрачной, подогрев в чайнике только необходимого количества воды;

- переход, по возможности, на максимально широкое использование иных источников тепла.

При реализации мероприятий энергосбережения и повышения энергоэффективности различают:

- *начальные инвестиции* (или увеличение, прирост инвестиций из-за выбора более эффективного оборудования);

- *единовременные затраты на проведение энергоаудита*;

- *единовременные затраты на приобретение и монтаж приборов учёта* и систем автоматического контроля, удаленного снятия показаний приборов;

- *текущие расходы* на поощрение ответственных за энергосбережение.

Эффекты от мероприятий энергосбережения можно разделить на несколько групп:

- экономические эффекты у потребителей (снижение стоимости приобретаемых энергоресурсов);

- эффекты повышения конкурентоспособности (снижение потребления энергоресурсов на единицу производимой продукции);

- эффекты для электрической, тепловой, газовой сети (снижение пиковых нагрузок приводит к снижению риска аварий, снижению потерь энергии, минимизации инвестиций в расширение сети);

- рыночные эффекты (снижение потребления электроэнергии, особенно в пиковые часы, приводит к снижению цен на энергию и мощность - важным является снижение потребления населением на освещение в вечернем пике);

- эффекты, связанные с особенностями регулирования (например, снижение потребления электроэнергии населением уменьшает нагрузку перекрестного субсидирования на промышленность);

- экологические эффекты (например, снижение потребления электрической и тепловой энергии в зимнее время приводит к разгрузке наиболее дорогих и «грязных» электростанций и огневых котельных).

Понятия об энергетическом аудите.

Под энергетическим аудитом будем понимать обследование предприятий, организаций и отдельных производств по их инициативе с целью определения возможностей экономии потребляемой энергии и помощи предприятию в осуществлении экономии на практике путем внедрения механизмов энергетической эффективности, а так же с целью внедрения на предприятии системы энергетического менеджмента.

Главной целью энергетического аудита является поиск возможностей энергосбережения и помощи субъектам хозяйствования в определении направлений эффективного энергоиспользования.

Объектом энергетического аудита может быть любое предприятие, энергетическая установка, здание, агрегат, потребляющий или вырабатывающий энергию.

Предметом энергетического аудита является система обследования потребления топлива и энергии, анализа и выдачи рекомендаций по эффективному использованию энергоресурсов.

Назначением энергоаудита является решение следующих задач:

- составление карты использования объектом ТЭР;
- разработка организационных и технических мероприятий, направленных на снижение потерь энергии;
- определение потенциала энергосбережения;
- финансовая оценка энергосберегающих мероприятий.

Энергетический аудит проводится энергосервисными компаниями или энергоаудиторами, которые уполномочены субъектами хозяйствования на его проведение.

Философия энергоаудита основывается на следующих посылках:

1) Энергоаудиторы должны обнаруживать факты, а не просто фиксировать ошибки;

2) Энергетические аудиты не должны проводиться скрытно.

Результаты, предоставляемые заказчику - это прежде всего отчет об энергетическом аудите, в котором определяются конкретные пути повышения эффективности использования ТЭР.

О*сновные этапы энергетического аудита:*

I этап. Получение информации об объекте энергоаудита:

а) сбор первичных данных о потреблении топлива, воды и электроэнергии за предыдущий и текущий годы;

б) анализ структуры энергопотребления по объекту;

в) анализ структуры затрат на энергию;

г) определение расхода энергоносителей на единицу выпускаемой продукции по предприятию и отдельным подразделениям.

II этап. Изучение топливно-энергетических потоков по объекту в целом и отдельным подразделениям:

а) составление схемы потребления энергетических ресурсов объектом;

б) составление карты и пользования энергетических ресурсов. Позволяет оценить транспортные потоки разных видов энергии и оценить наиболее энергоемкие подразделения;

в) составление баланса предприятия по отдельным видам энергоресурсов. Баланс позволяет в целом оценить эффективность использования различных энергоносителей;

г) составление топливно-энергетического баланса предприятия. Данный баланс объекта является основной для оценки правильности выбора энергоносителей, прогнозной оценки потребления энергоносителей;

д) выявление наиболее энергоемких потребителей и сбор данных;

е) определение удельных норм потребления энергии по отдельным потребителям. Это дает возможность сравнения с аналогичными нормами высокопроизводительных производств;

ж) составление энергетического баланса по отдельным энергоемким потребителям. Это позволяет оценить эффективность использования при различных видах энергии, выявить участки нерационального использования энергии, наметить пути экономии энергии.

III этап. Анализ эффективности использования ТЭР объектом:

а) а*нализ эффективности использования отдельных технологических процессов*. Дается заключение в правильности принятых в условиях действующего объекта отдельных технологических решений или о замене некоторых из них на более прогрессивные;

б) а*нализ эффективности использования ТЭР подразделениями.* Дается заключение о целесообразности использования того или иного энергоносителя на различных уровнях технологического процесса в подразделениях объекта, в случае замены энергоносителя дается соответствующее технико-экономическое обоснование;

в) анализ энергоиспользования отдельными потребителями;

г) определение сверх нормативных потерь топлива и энергии;

д) определение приоритетов для углубленного энергоаудита. Дополнительный энергетический аудит включает специальные обследования с использованием специфического измерительного оборудования или проведения научных исследований.

IV этап. Углубленный энергетический аудит отдельных технологических процессов и энергопотребителей:

а) проведение дополнительных замеров промежуточных параметров и определения рабочих режимов;

б) выявление эффективности работы потребителей;

в) решение специфических вопросов по договоренности с руководством.

V этап. Подведение итогов энергетического аудита:

а) разработка энергосберегающих мероприятий;

б) технико-экономический анализ эффективности внедрения мероприятий, сравнительный анализ полученных результатов;

в) выбор новых приоритетов и постановки задач на дальнейшее снижени е энергоемкости продукции и потребления энергоресурсов;

д) составление отчета по энергетическому аудиту.

Энергопользователь получает отчёт по энергоаудиту и может самостоятельно решать следующие проблемы:

а) определить, как потребляется энергия внутри объекта и сформулировать приоритеты по перечню энергосберегающих рекомендаций;

б) сравнить энергопотребление на данном объекте с величинами потребления энергии на других аналогичных объектах, определяя таким образом объект как «плохой» или «хороший» потребитель энергии;

в) показать необходимость инвестиций для приобретения и освоения нового более экономичного оборудования;

г) обосновать предложенный проект, который не был бы утверждён без поддержки внешнего консультанта.

Методология ведения энергоаудита зависит от той информации, которую стремится получить и за которую желает платить клиент, а также от состава используемого в ходе обследования контрольно-измерительного оборудования.

С одной стороны, *энергоаудит может быть простым обзором энергоопотребления*, основанным на данных счётчиков предприятия.

С другой стороны, *энергоаудит может быть комплексным и трудоемким* процессом, предусматривать установку нового постоянного измерительного оборудования, тестирование и измерение в течение длительного периода времени, и выдаст детальные рекомендации. Естественно, последний тип аудита будет значительно дороже, чем первый.

Выбор способа проведения энергоаудита зависит от следующих факторов: к*валификация энергоаудитора; имеющиеся измерители; понимание, чего требует и за что желает платить клиент*.

Простой энергоаудит обеспечивает базовое энергетическое обследование, делает общие выводы о потреблении энергии.

Комплексный энергоаудит:

а) обеспечивает детальное энергетическое обследование;

б) для точного определения энергопотребления использует такие приёмы, как регрессионный анализ и энергетический баланс;

в) рассматривает широкий круг возможностей энергосбережения, включая структурные изменения, такие как когенерация, децентрализация или использование альтернативных источников топлива;

Данная методология позволяет провести высококачественный энергоаудит, основанный на научном подходе, исследовании и измерении различных параметров, а также на опыте эксперта.

Список литературы

Основная

1 Болотов А.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники электроэнергии: Учебное пособие. - Алматы: АУЭС, 2011.-79 с.

2 Мукажанов В. Н. Возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. - Алматы: АУЭС, 2010. - 80 с.

3 Болотов А.В., Бакенов К.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники электроэнергии: Конспект лекций. – Алматы: АИЭС, 2007.- 40 с.

4 Безруких П.П., Арбузов Ю.Д., Г.А. Борисов и др. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. - СПб.: Наука, 2002.- 314 с.

5 Лабейш В. Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. - 79 с.

6 Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Альтернативные источники энергии. - М.: ИП РадиоСофт, 2014.- 248 с.

7 Джумамухамбетов Н.Г., Ирышков И.А., Жаналиева М.А. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. – Алматы: Эверо, 2010 – 218 с.

8 Қойшиев Т.Қ. Жаңғыртылатын энергия көздері. Оқулық. - Алматы: 2013. - 256 б.

9 Ляшков В.И., Кузьмин С.Н.Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2003. – 96 с.

10 Жамалов Ж. А., Умбетов Е.С., Кунелбаев М.М. Системы солнечного теплоснабжения. Монография. – Алматы: Полиграфия-сервис и К^0, 2010. – 180 с.

11 Лукутин Б. В. Возобновляемые источники электроэнергии: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. – 187 с.

12 Городов Р.В., Губин В.Е., Матвеев А.С. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. - Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 294 с.

Дополнительная

13 Твайделл Д., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 390 с.

14 Девинс Д. Энергия. Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 360 с.

15 Виссарионов В.И., Л.А.Золотов. Экологические аспекты возобновляемых источников энергии. - М.: МЭИ, 1996. - 156 с.

16 Гаджиев А.Г., Султанов Ю.Н., Ригер П.Н. и др. Геотермальное теплоснабжение. – М.: Энергоатомиздат, 1984. - 120 с.

17 Шефтер Я.Н. Использование энергии ветра. – М.: Энергоатомиздат, 1983. - 200 с.

18 Мак-Кормик М. Преобразование энергии волн. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 137 с.

Сводный план 2016 поз. 192

Исабай Танирбергенович Алдибеков

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Конспект лекций
для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика

Редактор Н.М. Голева
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать _____
Тираж 50 экз.
Объем 6,6 уч. – изд. л.

Формат 60х84 1/16
Бумага типографическая №1
Заказ____ Цена 3300 тг.

Копировально – множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013, Алматы, Байтурсынова, 126