



Реформирование программ
в сфере градостроительства на
пространстве Восточного соседства

В.Ф. Белей, В.В. Селин, А.О. Задорожный,
А.Ю. Никишин, Н.Н. Елагин, А.И. Соловей

СПРАВОЧНИК МОДУЛЯ: ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Реформирование программ в сфере градостроительства на пространстве Восточного соседства

Справочник модуля:

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Составитель: ФГБОУ ВПО «Калининградский
государственный технический университет», Россия

Дата: 2014.01.25



Tempus

Данный проект финансируется при поддержке Европейской комиссии. Настоящее издание отражает точку зрения автора. Европейская комиссия не несет ответственность за любое использование настоящей информации.

Рецензенты:

Филонов Александр Георгиевич, заведующий кафедрой судовых энергетических установок и теплоэнергетики ФГБОУ ВПО "КГТУ", к.т.н., доцент

Пусько Владимир Дмитриевич, директор

ООО «Калининградтеплогазпроект»

В.Ф. Белей, В.В. Селин, А.О. Задорожный, А.Ю. Никишин, Н.Н. Елагин, А.И. Соловей

Возобновляемые источники энергии: справочник модуля / под ред. В.Ф. Белея, В.В. Селина, А.О. Задорожного, А.Ю. Никишина, Н.Н. Елагина, А.И. Соловей. – Калининград.: ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2015. – 257 с.: ил.

Рассмотрены современные технологии использования возобновляемых источников энергии, позволяющие существенно повысить энергоэффективность и создать экономически выгодные условия обеспечения жизненного цикла застроенной среды. Справочник разработан на основе читаемых студентам лекций по курсу возобновляемые источники энергии и результатов исследований по ряду разделов модуля.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Электроэнергетика и электротехника». Может быть рекомендовано для студентов, обучающихся и по другим направлениям и специальностям.

Это исследование было проведено при поддержке проекта CENEAST (реформирование учебных программ застроенной среды в Восточном соседстве), финансируемого при поддержке Европейской комиссии. Выводы и мнения, представленные в настоящем документе, отражают только точку зрения авторов, и Комиссия не может нести ответственность за любое использование информации, содержащейся в нем.

УДК 620.97 (03)

© В.Ф. Белей,
В.В. Селин,
А.О. Задорожный,
А.Ю. Никишин,
Н.Н. Елагин,
А.И. Соловей, 2015

Содержание

Содержание	3
1 Введение	6
2 Описание модуля	7
3 Цели и предполагаемые результаты обучения	7
3.1 Цели модуля	7
3.2 Результаты обучения	7
4 Календарный план семестра и структура модуля	9
5 Формы обучения	9
6 Порядок проведения аттестации	11
7 Обратная связь	13
8 Преподавательский состав и вспомогательные источники	15
9 Учебная программа и материалы	16
9.1.1 Введение в лекцию	16
9.1.2 Цель и основные результаты обучения	16
9.1.3 Конспект лекции и раздаточные материалы	16
9.1.4 Практические вопросы и решения	28
9.1.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)	29
9.2 Тема лекции 2: Технологии использования солнечной энергии	32
9.2.1 Введение в лекцию	32
9.2.2 Цель и основные результаты обучения	32
9.2.3 Конспект лекции и раздаточные материалы	32
9.2.4 Практические вопросы и решения	92
9.2.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)	94

9.3 Тема лекции 3: Технологии использования ветровой энергии	96
9.3.1 Введение в лекцию	96
9.3.2 Цель и основные результаты обучения	96
9.3.3 Конспект лекции и раздаточные материалы	97
9.3.4 Практические вопросы и решения	138
9.3.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)	139
9.4 Тема лекции 4: Технологии использования водной энергии	144
9.4.1 Введение в лекцию	144
9.4.2 Цель и основные результаты обучения	144
9.4.3 Конспект лекции и раздаточные материалы	144
9.4.4 Практические вопросы и решения	172
9.4.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)	173
9.5 Тема лекции 5: Технологии использования биоэнергетических ресурсов	175
9.5.1 Введение в лекцию	175
9.5.2 Цель и основные результаты обучения	175
9.5.3 Конспект лекции и раздаточные материалы	176
9.5.4 Практические вопросы и решения	212
9.5.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)	213
9.6 Тема лекции 6: Технологии использования геотермальной энергии	219
9.6.1 Введение в лекцию	219
9.6.2 Цель и основные результаты обучения	219
9.6.3 Конспект лекции и раздаточные материалы	220
9.6.4 Практические вопросы и решения	240

9.6.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)	241
9.7 Тема лекции 7: Политические рамочные условия законодательств в области возобновляемой энергетики	244
9.7.1 Введение в лекцию	244
9.7.2 Цель и основные результаты обучения	244
9.7.3 Конспект лекции и раздаточные материалы	244
9.7.4 Практические вопросы и решения	254
9.7.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)	255

1 Введение

В последние годы в свете растущих цен на энергоносители и тех масштабных задач, которые диктует нам изменение климата, тема возобновляемых источников энергии (Renewable energy) стала одной из определяющих в мире. Возобновляемые виды энергии опираются на неисчерпаемые источники, включающие: энергию ветра, биоэнергию, солнечную энергию, гидроэнергию и геотермию. Все они вместе взятые потенциально способны в ближайшем будущем заменить ископаемые энергоносители, за счёт автономного использования обеспечить электроэнергией людей, проживающих вдали от коммунальных сетей, и в дополнение к этому - в регионах, страдающих от недостатка воды - гарантировать вполне надёжное снабжение питьевой водой. Возобновляемые виды энергии можно использовать для производства электроэнергии и тепла, а также для передвижения. Если ветер и солнце как источники электроэнергии дают разный по объёму конечный продукт в зависимости от погодных условий, то биоэнергия, гидроэнергия и геотермальная энергия являются такими источниками, которые почти не меняются и поддаются накоплению и регулированию. Таким образом, в целом это позволяет обеспечить надёжное и бесперебойное энергоснабжение, отвечающее спросу. Кроме того, благодаря чрезвычайно широкому диапазону мощностей - от считанных ватт до сотен мегаватт - возобновляемые виды энергии можно легко адаптировать под любой тип услуг, связанных с энергоснабжением, в том числе застроенной окружающей среды. Будучи тесно увязанными с новейшими методами создания и преобразования энергии, они способны - даже в самой современной промышленной компании - существенно повысить надёжность энергоснабжения.

Не в каждой стране возможно использование любых возобновляемых видов энергии в хозяйственных масштабах. Некоторые регионы обладают весьма привлекательными в экономическом отношении возможностями использования солнечной энергии.

Наилучшие возможности открываются в странах так называемого «солнечного пояса Земли» (между 20-м и 40-м градусами северной и южной широты). Опять же, технический потенциал ветряной энергии зависит от средней скорости ветра. А она, как правило, заметно ниже над массивами суши континентов, чем над океанами. Тем не менее, практически в каждой стране существуют места, привлекательные для использования самых разных видов возобновляемой энергии.

2 Описание модуля

Название направления подготовки: Теплоэнергетика и теплотехника.

Электроэнергетика и электротехника.

Уровень: Бакалавриат

Название модуля: Возобновляемые источники энергии.

Количество кредитных единиц: 4

Номер семестра: 5

Примерное количество часов: 144

Преподаватели: Профессора Виктор Селин и Валерий Белей, доценты Николай Елагин и Андрей Никишин

3 Цели и предполагаемые результаты обучения

3.1 Цели модуля

Цели модуля состоят в ознакомлении будущих бакалавров с возобновляемыми источниками энергии и стимулировании их деятельности для развития этого направления техники и технологии, в том числе и для жизненного цикла застроенной среды.

3.2 Результаты обучения

Знания и их применение

В случае успешного изучения модуля студент будет уметь:

- понимать эколого-энергетические проблемы мировой экономики, базирующейся в настоящее время преимущественно на невозобновляемых источниках энергии;

- применять техническую терминологию, используемую в модуле «Возобновляемые источники энергии»;

- применять знания в оценке доступных для использования возобновляемых энергетических ресурсов и оценки климатических последствий от их широкого применения в застроенной среде будущего;

- излагать информацию о современных и разрабатываемых в мире технологиях получения электрической и тепловой энергии для нужд мировой экономики на основе возобновляемых видов энергии;

- понимать политические рамочные условия, ориентированные на продвижение возобновляемых видов энергии;

- применять знания при расчетах экономической эффективности использования возобновляемых источников энергии.

Исследовательские навыки

В случае успешного изучения модуля студент будет уметь:

- проводить эксперимент по заданной методике и анализу результатов с привлечением соответствующего математического аппарата;

- сравнивать, анализировать, оценивать имеющиеся виды возобновляемых источников энергии и принимать решения в области жизненного цикла застроенной среды.

Специальные умения

В случае успешного изучения модуля студент будет уметь:

- проводить комплексный анализ возможностей использования различных видов источников возобновляемой энергии для жизненного цикла застроенной среды.

Социальные умения

В случае успешного изучения модуля студент будет уметь:

- на основе приобретенных знаний принимать и проверять решения, демонстрировать мотивированное и ответственное отношение к своей профессии.

Личные качества

В случае успешного изучения модуля студент будет уметь:

- самостоятельно и дисциплинированное решать проблемы, оценивать влияние принятых решений на окружающую среду;
- принимать участие в групповых обсуждениях и презентациях по Интернету;
- самостоятельно изучать литературу, выбирать направления развития, повышать квалификацию.

4 Календарный план семестра и структура модуля

Номер недели	Тема лекции
1	Введение в модуль
2	Возобновляемые источники энергии – энергия будущего для обеспечения жизненного цикла застроенной окружающей среды
3-6	Технологии использования солнечной энергии
7-8	Технологии использования ветровой энергии
9-11	Технологии использования водной энергии
11-13	Технологии использования энергии биоэнергетических ресурсов
14	Технологии использования геотермальной энергетики
15	Политические рамочные условия мировых законодательств в области возобновляемой энергетики

5 Формы обучения

Основной материал модуля представляет собой конспекты лекций и задания преподавателей, расположенных на платформе Moodle. Они включают в себя интерактивные задания для промежуточной оценки

знаний как преподавателем, так и самим студентом (самооценка). Студентам предлагаются ссылки на дополнительные материалы в сети Интернет, например, базы данных, включая ScienceDirect, Scopus, электронные библиотеки и т.д.

На сайте проекта TEMPUS http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU представлены видеоматериалы, калькуляторы и программное обеспечение лучших университетов мира с открытым кодом, дополняющие настоящий модуль. С помощью калькуляторов и программного обеспечения студентам предлагается выполнить расчеты в процессе выполнения реферата и заключительной работы. Также студенты могут сдавать часть экзамена с использованием понравившегося им видеоматериала. Студенты могут дополнить базу данных видеоматериалов, калькуляторов и программного обеспечения настоящего модуля.

Преподавание происходит посредством модерации обсуждений на форуме с целью подготовки письменных работ. Кроме того, для большей сплоченности группы, нивелирования «изоляции» обучаемых в процессе дистанционного обучения, реализации возможностей проявления и тренировки навыков аргументирования, а также для поддержания обратной связи студенты будут приглашаться для участия в онлайн-дискуссиях, взаимной оценке и групповой работе (участие в форумных обсуждениях обязательно).

Все студенты будут использовать виртуальную среду Moodle в процессе обучения. Программы используют стратегию электронного обучения для передачи данных. Метод основан на следующих принципах:

1. Высококачественное интегрированное содержание модуля, сочетающее в себе разнообразные виды информации для достижения целей модуля;

2. Коммуникация и предоставление работ для оценки через Интернет;

3. Онлайн поддержка преподавателя в ходе изучения модуля.

Для решений практических занятий студенты будут использовать компьютерные системы обучения, которые представлены на сайте проекта TEMPUS (<http://www.ceneast.com/>).

6 Порядок проведения аттестации

Экзамен, реферат

Итоговая оценка выставляется по результатам применения знаний студентов на практике и подготовки реферата (4000 слов) с точки зрения различных аспектов с помощью компьютерных систем обучения.

График проведения аттестаций в учебном году

Номер недели	Форма контроля знаний
15-16	Реферат
17	Экзамен (е-тест)

Порядок проведения экзамена

Цель экзамена – проверка усвоения понятий предметной области. Само собой разумеется, что студенты не должны прибегать к какой-либо помощи (или принимать таковую) во время экзамена. Еще более важно, факты использования такой помощи не должны выявляться в процессе экзамена.

Экзамен проводится по Интернету при помощи электронной экзаменационной системы. Тест включает 20 вопросов, ответы даются online. Дополнительно будет использована биометрическая и интеллектуальная система самооценки успеваемости студента.

Методы оценки реферата: проблемные вопросы, вопросы, на которые требуются краткие ответы, online дискуссии, экспертная оценка.

Инструкции по предоставлению работ и крайние сроки

При предоставлении реферата следует соблюдать следующие инструкции:

- соблюдение крайних сроков необходимо, если только они не были продлены руководителем программы.

Сроки сдачи могут быть продлены только в уважительных случаях, как например, состояние здоровья или чрезвычайная ситуация, с предоставлением соответствующих документов:

- электронная версия реферата подается через систему Moodle;
- электронная версия подается через систему Moodle до завершения срока сдачи (неделя №16). Работы подаются в формате .doc (msword) или .pdf. Предоставление работ в иных форматах может послужить поводом к возврату работы;

- каждый реферат будет подвержена тщательной проверке на плагиат посредством специального программного обеспечения.

Взыскания за несвоевременную сдачу работы

За каждый полный или неполный день просрочки (но не более 5 дней) снимается 5% от максимальной возможной оценки за данный вид работы.

Работы не принимаются:

- по истечении 5 рабочих дней после завершения срока сдачи;
- после предоставления результатов оценки работы преподавателем любому из студентов.

Несвоевременная сдача online экзамена не разрешается.

Метод расчета оценки по модулю

$$M = 0.7C + 0.3(y_1 + y_2 + \dots + y_{20}),$$

где C – оценка реферата, $y_1, y_2, \dots, y_{20}$ – оценка за тест из 20 вопросов, за каждый правильный ответ начисляется 0,5 балла.

7 Обратная связь

Право на получение информации по итогам аттестации

Все студенты получают информацию по итогам аттестации. Такая информация предоставляется каждому студенту индивидуально (относительно отдельных вопросов по его работе) и всей группе в целом (относительно общих вопросов по оценке работы группы студентов в целом).

Обратная связь. Процедура предоставления итогов оценки рефератов и экзаменов

- **Итоги экзаменов**

Итоги экзамена предоставляются электронной экзаменационной системой непосредственно после окончания теста. В случае неверных ответов дается ссылка на учебные материалы с целью совершенствования знаний.

- **Итоги оценки реферата**

Предоставляются в максимально короткие сроки после сдачи работ (в 5-дневный срок после сдачи работы).

Образец предоставления итогов оценки реферата

Модуль и инструмент оценки	Комментарии
Задача оценки: промежуточная О или итоговая О	
Критерии оценки:	1. 2. 3.

Оценка: (в баллах)	
Комментарий:	
Для последующего изучения:	
Комментарий студента:	
Ответ преподавателя:	

- **Временные рамки по предоставлению итогов аттестации**

В течение 5 дней после окончания экзаменационной сессии.

Контактные данные (помощь и консультации)

Профессора Виктор Селин viktor.selin.35@mail.ru и Валерий Белей vbeley@klgtu.ru.

Доценты Николай Елагин elagin137@bk.ru, fpk@klgtu.ru и Андрей Никишин nikduke@klgtu.ru.

8 Преподавательский состав и вспомогательные источники

Обязанности преподавателей, руководителей программы и вспомогательного (координационного) персонала

Основная обязанность преподавателей модуля: подача материалов модуля согласно программе.

Основные обязанности координаторов модуля:

- планирование и внесение изменений в модуль;
- координация и управление профессорско-преподавательским составом;

- координация проведения экзаменов.

Основные обязанности руководителей программы:

- управление программой на регулярной основе;
- обеспечение получения студентами положительного опыта в процессе обучения;
- мониторинг, пересмотр и расширение содержания программы и методов преподавания.

Вспомогательный персонал осуществляет психологическую, кураторскую поддержку студентов (самостоятельно либо путем рекомендации других источников такой поддержки)

Контактные данные преподавателей модуля:

Профессора Виктор Селин viktor.selin.35@mail.ru и Валерий Белей vbeley@klgtu.ru.

Доценты Николай Елагин elagin137@bk.ru, fpk@klgtu.ru и Андрей Никишин nikduke@klgtu.ru.

9 Учебная программа и материалы

9.1 Тема лекции 1: Возобновляемые источники энергии – энергия будущего для обеспечения жизненного цикла застроенной окружающей среды

БЕЛЕЙ В. Ф.

9.1.1 Введение в лекцию

Тема знакомит с потенциалом невозобновляемых источников энергии и влиянием на экологию от их использования в мировой экономике. Анализируются эффективность мировой экономики и обеспечение жизненного цикла застроенной окружающей среды при использовании технологий на основе возобновляемых источниках энергии.

9.1.2 Цель и основные результаты обучения

Целью обучения по этой теме является оценка эффективности мировой экономики и жизненного цикла застроенной окружающей среды при использовании технологий на основе возобновляемых источников энергии. Результатами обучения являются полученные знания: о потенциале невозобновляемых источников энергии и экологических последствиях от его использования; основных проблемах мировой экономики и жизненного цикла застроенной окружающей среды при использовании технологий на основе возобновляемых источников энергии.

Предполагаемые основные результаты обучения соответствуют выше предусмотренным целям.

9.1.3 Конспект лекции и раздаточные материалы

Все материалы, видео, и программное обеспечение лучших университетов мира с открытым кодом можно найти по ссылке: (http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU).

Материал лекции включает в себя следующие разделы:

1. Потенциал невозобновляемых источников энергии и экологические последствия от его использования;
2. Основные проблемы застроенной окружающей среды, решаемые при использовании возобновляемых источников энергии;
3. Удовлетворение потребностей в энергии за счет технологий использования возобновляемых источников энергии;
4. Обеспечение энергобезопасности при использовании возобновляемых источников энергии;
5. Ослабление процесса изменения климата при использовании возобновляемых источников энергии.

Каждый раздел состоит из различных материалов, видео, калькуляторов и программного обеспечения с открытым кодом.

Земля обладает ограниченными запасами невозобновляемых источников энергии. Основу энергетики мира в настоящее время составляют традиционные ископаемые ресурсы: уголь, нефть, естественный уран и природный газ (таблица 9.1.3.1).

Таблица 9.1.3.1. Невозобновляемые источники энергии

Ископаемые	Доказанные запасы	Срок истощения, лет
Уголь, млрд. тонн	847,5	133
Нефть, млрд. т.	168,6	41,6
Нефтяные сланцевые плевы, млрд. тонн	157,2	-
Природный газ, трлн. м ³	177,4	60,3
Нетрадиционный газ, в том числе сланцевый (200), трл. м ³	328,0	-
Естественный уран, тыс. тонн	2000	36/1000 Реакторы на быстрых нейтронах

Значительная часть ресурсов: невозобновляемых источников энергии расходуется на производство электрической энергии (таблица 9.1.3.2).

Таблица 9.1.3.2. Соотношение доли источников энергии в производстве электрической энергии в мире

Всего	Уголь	Водная энергия	Природный газ	Ядерное топливо	ВИЭ
100%	41%	16%	14%	12%	4%

Несмотря на то, что гидроэнергетика относится к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), в таблице 9.1.3.2 ее доля показано отдельно. Это позволяет констатировать, что доля электроэнергии, вырабатываемой за счет преобразования солнечной, ветровой, геотермальной и энергии биомассы, очень низкая. Использование невозобновляемых источников энергии является одним из основных источников загрязнения окружающей среды (таблица 9.1.3.3).

Таблица 9.1.3.3 Выбросы систем (грамм/кВт*час) на традиционных источниках энергии за жизненный цикл

Тип топлива	Уголь	Нефть	Газ	Атомная энергия
CO ₂	995	818	430	63
SO ₂	12	14	-	0,04
NO _x	4,3	4,0	0,5	0,32

Угольная энергетика является наиболее грязной. Наряду с вредными выбросами в атмосферу (таблица 9.1.3.3), она является источником золошлаковых отходов, радиоактивного загрязнения. В качестве примера: угольная электростанция Драх обеспечивает 7% всей электроэнергии, требуемой Великобританией. Она является наиболее эффективной электростанцией на угле в Великобритании, даже при том, что ежегодно производит около 1,5 млн. тонн золы и

22,8 млн. тонн углекислого газа. Это еще раз доказывает, что даже самая «чистая» из электростанций, работающих на угле, – грязная.



Источник: http://www.cheburek.net/wp-content/uploads/2009/06/11_drax1

Рисунок 9.1.3.1. Угольная электростанция Drax – Selby, (Великобритания)

Катастрофа на платформе компании BritishPetroleum на шельфе Мексиканского залива обострила значимость проблем нефтяной отрасли.



Источник: <http://greenconsumption.org/meksikanskij-zaliv-ehkologicheskaja-katastrofa-xxi-veka>, <https://www.gismeteo.ru/news/proisshestviya/meksikanskiy-razliv-british-petroleum/>

Рисунок 9.1.3.2. Катастрофа на нефтяной платформе компании British Petroleum

Несмотря на ряд достоинств атомной энергетики: запасы ядерного топлива оцениваются в 1000 лет, низкий уровень выброса CO_2 ; аварии на атомных электростанциях (АЭС) приводят к катастрофическим последствиям. Наиболее крупные из таких аварий произошли: 28 марта 1979 г. на АЭС Три-Майл-Айленд (США); 28 апреля 1986г. на Чернобыльской АЭС (СССР) и 12 марта 2011 года на Фукусимской АЭС (Япония) (рисунок 9.1.3.3). В настоящее время в мире общее число действующих блоков составляет 435 при общей установленной мощности 370 ГВт. На стадии строительства 71

энергоблок. Число атомных энергоблоков в Японии 48, и ни один из которых в настоящее время не эксплуатируется. Поэтому сценарии развития атомной энергетики отличаются неопределенностью.



Источник: <http://juche-songun.ru/>, <http://www.greenpeace.org/international/en/news/Blogs/nuclear-reaction/fukushima-crisis-rolls-on-as-tepcos-admits-rad/blog/46051/>

Рисунок 9.1.3.3. Авария на Фукусимской АЭС (Япония, 12 марта 2011 года)

Запасы газа довольно значительны, особенно с учетом запасов сланцевого газа (таблица 9.1.3.1). Однако современная технология добычи сланцевого газа методом гидроразрывов имеет серьезные

экологические последствия: зараженные токсическими отходами водоемов, тяжелые болезни животных и людей и прочее.



Источник: http://protivzavoda.com/wp-content/uploads/2013/03/shema_slancev_gas.jpg

Рисунок 9.1.3.4. Технология добыча сланцевого газа

Истощение запасов невозобновляемых источников энергии, глобальные задачи, связанные с решением проблем изменения климата - являются мощными стимулами для использования в мире ВИЭ. На тенденции развития мировой энергетики решающее влияние оказывает смена парадигмы развития общества. Каждый кризис вызывал изменение динамики мировой экономики, которая сходилась с устойчивой траектории экспоненциального развития и переходила на новую траекторию (рисунок 9.1.3.5).

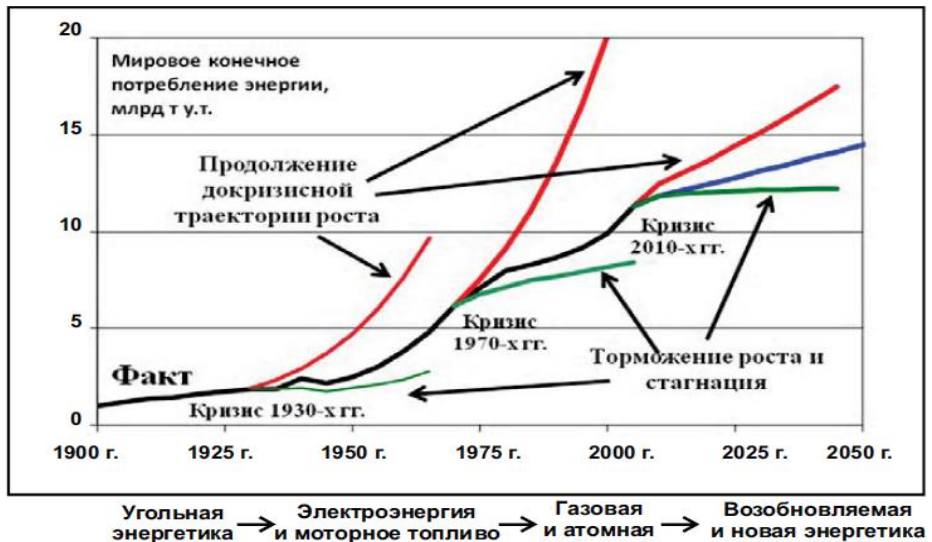


Рисунок 9.1.3.5. Динамика развития мировой экономики

При рассмотрении потенциала возобновляемых источников энергии различают их валовый (теоретический), технический и экономический потенциалы.

Валовый потенциал – это количество энергии, заключенное в данном виде энергоресурса, при условии ее полного полезного использования.

Технический потенциал – это энергия, которая может быть получена от использования теоретического потенциала при современном уровне развития технических средств и экологических норм.

Экономический потенциал – часть технического потенциала, который экономически целесообразно преобразовывать в полезную энергию при конкретных экономических условиях.

Все эти категории запасов энергии оцениваются среднегодовой выработкой энергии W_{cp} (кВт*час; тонн условного топлива – т.у.т).

Таблица 9.1.3.4 Теоретические ресурсы возобновляемых источников энергии в мире

Источники энергии	Ресурсы. млн. т.у.т
Энергия солнца	$130 \cdot 10^6$
Энергия ветра	$0,2 \cdot 10^6$
Геотермальная энергия (до глубины 10 км)	$4800 \cdot 10^6$
Энергия мирового океана	$0,25 \cdot 10^6$
Энергия биомассы	$0,1 \cdot 10^6$
Гидроэнергия	$0,005 \cdot 10^6$

В мире в 2013 было выработано 23300 млрд. кВт*час электрической энергии. Это на несколько порядков меньше теоретических ресурсов ВИЭ. По прогнозам доля возобновляемой энергетики в мире к 2060 году достигнет 70% (рисунок 9.1.3.6).

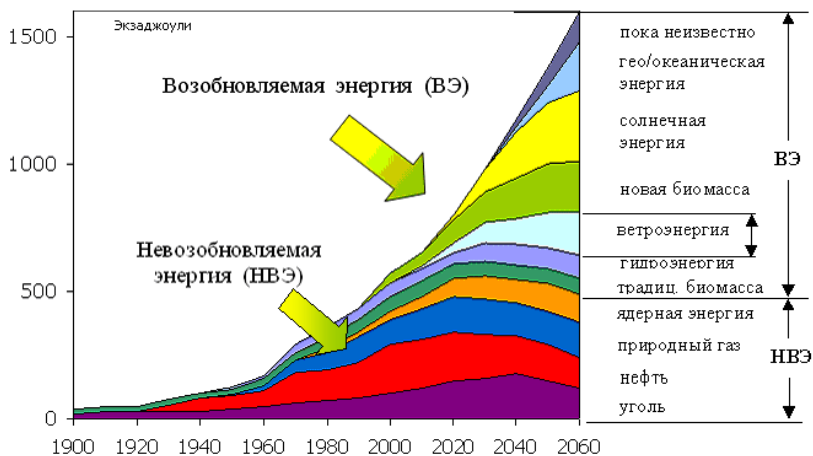


Рисунок 9.1.3.6. Прогноз развития мировой энергетики

Следует отметить, что и в настоящее время ряд стран интенсивно увеличивают долю ВИЭ в энергобалансе. Так, Германия установила новый рекорд: доля ВИЭ в энергосистеме страны составила 75% в дневное время воскресного дня (11 мая 2014). За

первый квартал 2014 года Германия поставила еще один рекорд - 27% (42 млрд. кВт*час) в энергобалансе страны составили ВИЭ. Если рассматривать отношение инвестиций в солнечную энергетику к ВВП страны, то Болгария занимает первое место в мире. Далее Чехия и Германия. При этом, Болгария под давлением общественности отказалась от добычи сланцевого газа из-за возможных необратимых экологических последствий. Таким образом, ВИЭ это энергия будущего для обеспечения мировой экономики жизненного цикла застроенной окружающей среды. Для реализации потенциала ВИЭ разработаны соответствующие технологии.

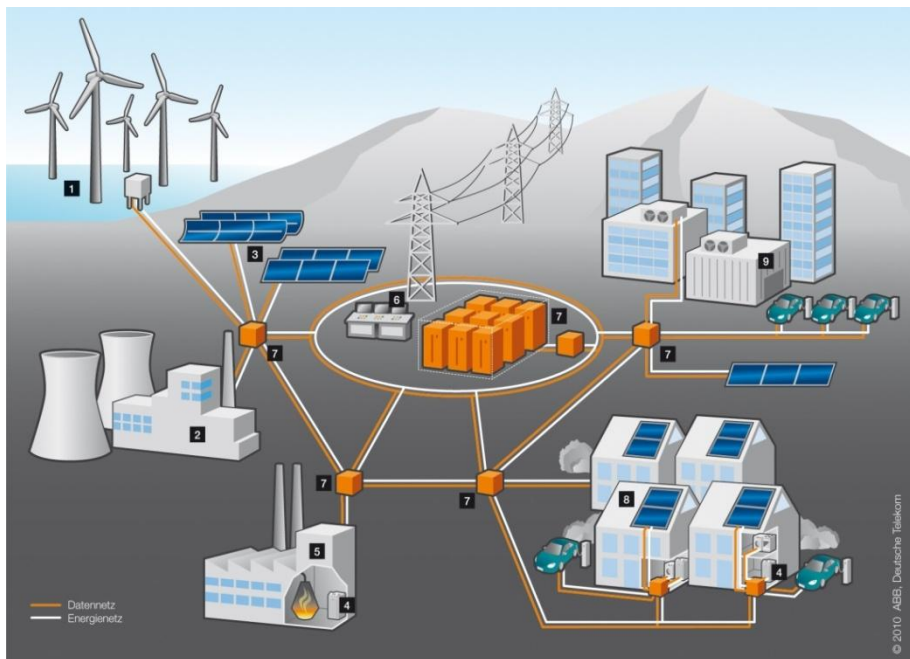
Рассмотрим ряд основных достоинств использования в мире технологий на основе возобновляемых источниках энергии:

- являются экологически чистыми и оказывают незначительное влияние на окружающую среду;
- имеются повсеместно, что уменьшает зависимость потребителей от импорта энергии;
- не вызывают проблем, связанных с удалением отходов и выбросами, и значительно снижают интерес в качестве потенциальной цели для террористов;
- биомасса, после соответствующей переработки, может быть использована в качестве топлива для различных типов двигателей, обеспечивая мобильность экологически рациональным способом;
- сочетание источников электроэнергии в комбинации с интеллектуальной технологией управления повышает надежность и эффективность энергоснабжения.

Для реализации этого направления в мире первостепенное внимание уделяется созданию систем управления энергосистемой «Умная энергосистема».

«Умная энергосистема» является обобщением развиваемых в настоящее время «умных сетей» (Smart Grids) и предполагает

управлением спросом на энергию (рисунок 9.1.3.7). В США и ЕС развитие «умных сетей» признано ключевой задачей.



Источник: <http://www.abb.de/cawp/seitp202/77a7e74be1ea8904c12577050030ab14.aspx>

Рисунок 9.1.3.7. Умная сеть (Smart Grid)

Автономное энергоснабжение

В мире значительная часть людей не имеют доступа к сетям энергоснабжения общего пользования. Автономные энергетические установки на основе ВИЭ способны обеспечить снабжение энергией в тех местах, где строительство сетей технически затруднено или экономически невыгодно. Биоэнергетические, ветроэнергетические, гелиотермические, и геотермальные установки могут обеспечить энергией, необходимой для электроснабжения, отопления, охлаждения, приготовления горячей воды и пищи в домашних хозяйствах и технологического теплоснабжения застроенной среды.

Стоимость энергоснабжения

Цены на ископаемую энергию отражают лишь незначительную часть затрат, которые имеют место. Если же учесть все внешние затраты, связанные с экологическим ущербом и политическими конфликтами, обусловленные добычей, транспортировкой и использованием невозобновляемых источников энергии, то ВИЭ могут оказаться конкурентоспособными, а в ряде случаев даже более дешевыми, чем невозобновляемые источники энергии (рисунок 9.1.3.8).

Экологический ущерб, обусловленный использованием ископаемого топлива, в особенности ущерб, вызванный изменениями климата и загрязнением воздуха, становятся все более важным экономическим фактором при принятии решений, определяющих экономическую политику. Так, затраты на выбросы CO₂, связанные с торговлей эмиссионными квотами согласно Киотскому протоколу, уже оказывают влияние на инвестиционные потоки в настоящее время, в том числе при оценке возведения новых электростанций. Важную роль играет и новый масштаб рисков, с которым сталкивается общество в связи с проблемой изменения климата.

Кроме того, загрязнения, обусловленные сжиганием ископаемого топлива, являются основной причиной смога и кислотных дождей.



Источник: www.renewable-made-in-gemany.com

Рисунок 9.1.3.8. Хозяйственные затраты на ископаемые источники энергии

Следует отметить, что себестоимость энергии, выработанной на основе ВИЭ, за счет совершенства технологий непрерывно снижется, что содействует к более широкому использованию ВИЭ в мире.

9.1.4 Практические вопросы и решения

1. Срок истощения традиционных невозобновляемых источников энергии?
2. Экологические последствия от использования невозобновляемых источников энергии?
3. Проблемы застроенной окружающей среды, решаемые при использовании возобновляемых источников энергии?

4. Какие технологии использования возобновляемых источников энергии способны обеспечить энергоснабжение застроенной окружающей среды?

5. Какие технологии использования возобновляемых источников энергии для электроэнергетических систем?

6. Как влияют использование технологий использования возобновляемых источников энергии на обеспечение энергобезопасности застроенной окружающей среды?

7. Как влияют использование технологий использования возобновляемых источников энергии на ослабление процесса изменения климата?

Студент может также найти вопросы самоконтроля по видео (см.: электронные бизнес видео) и задачи, которые должны быть решены с помощью калькуляторов (см.: электронные бизнес-калькуляторы) по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU.

9.1.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)

1. Brian Black, Richard Flarend. Alternative Energy, 2010
2. Jakub Piotrowski, Leszek Kowalczyk. Energy Costs, International Developments and New Directions, 2009
3. John R. Fanchi, Christopher J. Fanchi. Energy in the 21st Century, 2011
4. Hatim Machrafi. Green Energy and Technology, 2012
5. V.G. Cho, W.H. Lee. Handbook of Sustainable Energy, 2010
6. Zachary A. Smith, Katrina D. Taylor. Renewable and Alternative Energy Resources : A Reference Handbook, 2008
7. Roy M. Harrison, R.E. Hester. Sustainability and Environmental Impact of Renewable Energy Sources, 2003

8. Ramesh C. Bansal, Ahmed F. Zobaa. Handbook of Renewable Energy Technology, 2011
9. Michael F. Hordeski. Megatrends for Energy Efficiency and Renewable Energy, 2011
10. J. O'M Bockris. Renewable Energies : Feasibility, Time and Cost Options, 2009
11. Indra Overland, Heidi Kjærnet. Russian Renewable Energy : The Potential for International Cooperation, 2009
12. M.G. Carvalho, Naim Afgan. 2004 New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development, 2007
13. Gregory Kats, Michael James, Jon Braman. Greening Our Built World : Costs, Benefits, and Strategies, 2010
14. www.renewable-made-in-germany.com
15. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика.- СПб.:Наука, 2013.- 308с.
16. Мельникова С.И., Сорокин С., Горячева А., Галкина А.А. «Первые 5 лет «сланцевой революции» - что мы теперь знаем наверняка?» // Центр изучения мировых энергетических рынков ИНЭИ РАН; под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. – 2012.-ноябрь
17. Грушевенко Д. А., Грушевенко Е.В. Нефть сланцевых плеев – новый вызов энергетическому рынку? // Информационно-аналитический обзор; под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина.- М.; ИНЭИ РАН, 2012.
18. Martin Jakubowsri Unit evolves strategies for global industry of renewable energy/ Martin Jakubowsri // Energy. – 2000. – S. 58-59.
19. Бертан Баррэ, Пьер-Рене Боки. Атомная энергия: понять будущее. - М.: АНО, 2011.-204с.
20. В мире действуют 435 атомных энергоблока. [Электронный ресурс]. URL:<http://www.Atominfo.ru>. 08.02.2014.

21. Статистический ежегодник мировой энергетики, 2013.
22. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие. -Томск: Изд-во ТПУ, 2008.-187с
23. Белей В.Ф. Возобновляемые источники энергии и перспективы их использования в Калининградской области/В.Ф. Белей, В.В. Селин, В.Ф. Паршина//Известия КГТУ.-2007.–№11.– С.11
24. Белей В.Ф. Тенденции развития мировой энергетики и проблемы надежности Калининградской энергосистем / В.Ф. Белей / Балтийский морской форум, 26-30 мая 2014 г., г. Светлогорск. Сборник докладов. Изд-во БГА РФ. – 2014. С. 12.

9.2 Тема лекции 2: Технологии использования солнечной энергии

НИКИШИН А.Ю., СОЛОВЕЙ А.И.

9.2.1 Введение в лекцию

Тема знакомит с оценкой потенциала использования и перспективами солнечной энергетики в мире, классификацией и основными типами солнечных энергетических установок, методами расчета их мощности. Даны основные схемы непосредственного использования солнечной энергии. Изложены экологические аспекты влияния солнечных энергетических установок на застроенную окружающую среду и экономические аспекты их использования в этой среде.

9.2.2 Цель и основные результаты обучения

Целью обучения по этой теме является изучение технологий по энергетическому использованию солнечного излучения на Земле, включая преобразование в тепловую и электрическую энергию. Результатом обучения является получение сведений: о возможностях и технологиях использования солнечной энергии; экологичности технологий использования солнечной энергии для процесса устойчивого существования застроенной окружающей среды; экономической эффективности этих технологий.

9.2.3 Конспект лекции и раздаточные материалы

Все материалы, видео, программное обеспечение лучших университетов мира с открытым кодом вы можете найти по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU. Материал лекции включает в себя следующие разделы:

1. Источник солнечного излучения и определение потенциала использования.

2. Классификация солнечных энергетических установок.
3. Солнечная электроэнергетика.
4. Солнечная теплоэнергетика.
5. Социально-экологические аспекты использования солнечной энергетики.

Каждый раздел состоит из различных материалов, находящихся в открытом доступе и программного обеспечения с открытым кодом.

9.2.3.1. Источник солнечного излучения и определение потенциала использования

Солнечная энергетика – это область энергетики, связанная с преобразованием солнечной энергии в электрическую и тепловую энергию. Или, более развернуто - отрасль науки и техники, разрабатывающая научные основы, методы и технические средства использования энергии солнечного излучения на Земле и в космосе для получения электрической, тепловой или других видов энергии и определяющая области и масштабы эффективного использования энергии Солнца в экономике страны.

История человечества знает немало интересных способов использования энергии Солнца для разных целей. Например, Архимед в 212 г. до н. э. с помощью зеркал направил солнечные лучи на корабли римлян, чтобы предотвратить захват Сиракузы. Однако у некоторых историков имеются сомнения относительно этого. Известный итальянский ученый и художник Леонардо да Винчи составил в 1515 г. один из первых планов использования энергии Солнца в промышленности. В его книгах есть рисунки нескольких проектов огромного параболического зеркала “для подачи тепла к бойлеру на красильной фабрике”. В конце XVIII ст. французский химик Антуан Лавуазье изобрел солнечную печь, в которой можно было плавить платину при температуре 1780 °С. Шведский ученый

Гораций де Соссюр изобрел первый в мире солнечный коллектор, который он использовал для приготовления пищи во время экспедиции по Южной Африке в 1830 г. История промышленного использования солнечной энергии в Америке началась в 80-х годах XIX ст. с работ инженера Джона Эриксона, который был энтузиастом создания тепловых двигателей, которые работали бы на солнечной энергии.

Масса Солнца составляет 99,866 % от суммарной массы всей Солнечной системы, его излучение – основной источник энергии на Земле. Физические характеристики Солнца приведены в таблице 9.2.3.1.

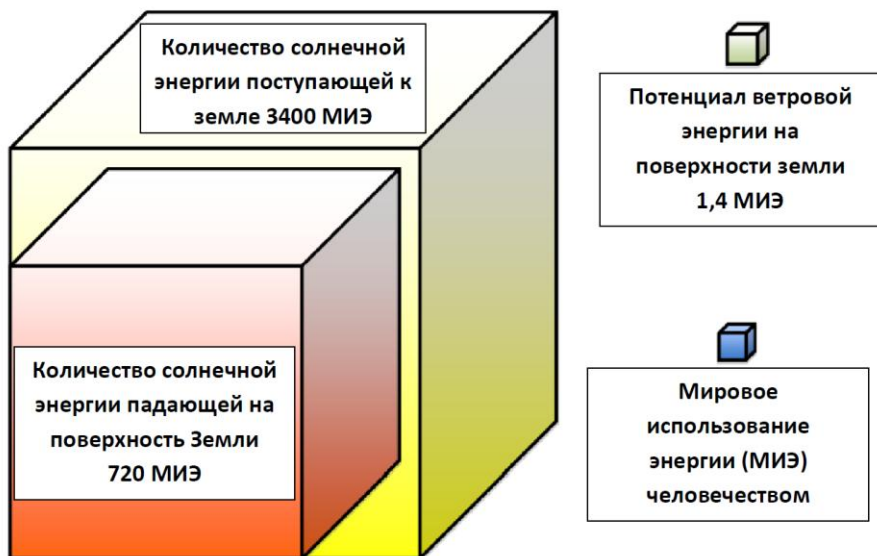
9.2.3.1. Физические характеристики Солнца

Средний диаметр	$1,392 \cdot 10^9$ м (109 диаметров Земли)
Объём	$1,40927 \cdot 10^{27}$ м ³ (1 301 018,805 объёмов Земли)
Масса	$1,9891 \cdot 10^{30}$ кг (332 982 масс Земли)
Средняя плотность	1409 кг/м ³
Эффективная температура поверхности	5778 К
Светимость	$3,846 \cdot 10^{26}$ Вт ($\sim 3,75 \cdot 1028$ Лм)
Яркость	$2,009 \cdot 10^7$ Вт/м ² /ср

Солнце – гигантский “термоядерный реактор”, который работает на водороде и каждую секунду путем плавления перерабатывает 564 млн. т. водорода в 560 млн. т. гелия и выбрасывает в окружающее пространство в среднем $4 \cdot 10^9$ кг материи в форме солнечного излучения (СИ), которое имеет две составляющих, электромагнитную и корпускулярную. Часть этого излучения поглощается его собственными внешними неактивными слоями, в результате чего спектральное распределение солнечного излучения становится относительно непрерывным.

Корпускулярная часть солнечного излучения состоит преимущественно из протонов, движущихся от Солнца со скоростями 300—1500 км/с и интереса с точки зрения получения значительного количества энергии на Земле не представляет.

Земля находится от Солнца на расстоянии примерно 150 млн. км и получает от Солнца менее одной двухмиллиардной его излучения или приблизительно $1,5 \cdot 10^{18}$ кВт·ч ежегодно, при этом поверхности Земли достигает лишь около $7 \cdot 10^{17}$ кВт·ч. Площадь поверхности Земли, облучаемой Солнцем, составляет около $5 \cdot 10^8$ км², что дает среднее удельное поступление СИ 200 - 250 Вт/м² или 1752-2190 кВт·ч/м² год, что значительно превышает ресурсы всех других возобновляемых источников энергии (рисунок 9.2.3.1).



Источник: WindEnergy: C.L. Archer and M.Z. Jacobson, J. Geophys. Res. 110, D12110 (2005).

Рисунок 9.2.3.1. Ресурсы солнечной энергетики

Спектр СИ можно разделить по длине электромагнитных волн на три основные зоны (рисунок 9.2.3.2):

- ультрафиолетовое излучение (длины волн до 0,4 мкм) - 9 % интенсивности;
- видимое излучение (длины волн от 0,4 мкм до 0,7 мкм) - 45 % интенсивности;
- инфракрасное (тепловое) излучение (длины волн более 0,7 мкм) - 46 % интенсивности.

Спектральная плотность СИ зависит от длины электромагнитной волны (рисунок 9.2.3.2).

Для количественной оценки излучения применяется величина, называемая солнечной постоянной (в некоторых источниках – интенсивностью, $E_C = [\text{Вт/м}^2]$). Это суммарный поток солнечного излучения, проходящий за единицу времени через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы. Она определяется, как площадь всей фигуры под соответствующим графиком (оранжевый цвет на рисунке 9.2.3.2)

По международному соглашению 1981 г в качестве E_C в расчетах рекомендовалось принимать $E_C = 1370 \text{ Вт/м}^2 = 1,96 \text{ кал/мин*см}$. В России в различных источниках рекомендуется принимать E_C в диапазоне от 1350 до 1360 Вт/м².

На солнечную постоянную влияют два основных фактора: расстояние между Землей и Солнцем, (изменяется в течение года по причине эллиптичности орбиты Земли, годичная вариация 6,9 % — от 1,412 кВт/м² в начале января до 1,321 кВт/м² в начале июля) и изменения солнечной активности, обусловленные изменением числа и суммарной площади солнечных пятен (поток излучения меняется сильнее всего в рентгеновском и радиодиапазоне, рисунок 9.2.3.3).

Из-за поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения - озоном и рассеяния излучения молекулами газов и находящимися в воздухе частицами пыли и аэрозолями солнечный свет при прохождении через атмосферу ослабляется.

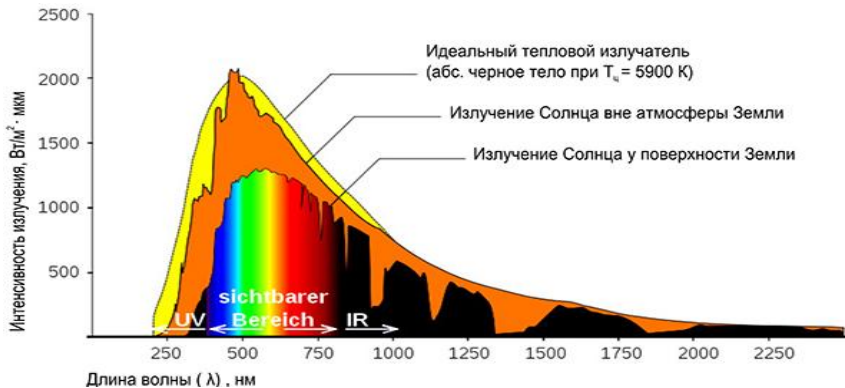
Чтобы учесть влияние атмосферы на интенсивность и спектральный состав солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, вводится понятие атмосферной массы (АМ).

При нулевой воздушной массе $AM = 0$ интенсивность излучения равна $E_c = 1,35 \text{ кВт/м}^2$. Величина $AM = 1$ соответствует прохождению солнечного излучения через безоблачную атмосферу до уровня моря при зенитальном расположении Солнца.

Воздушная масса для любого уровня земной поверхности в любой момент дня определяется по формуле 9.2.3.1

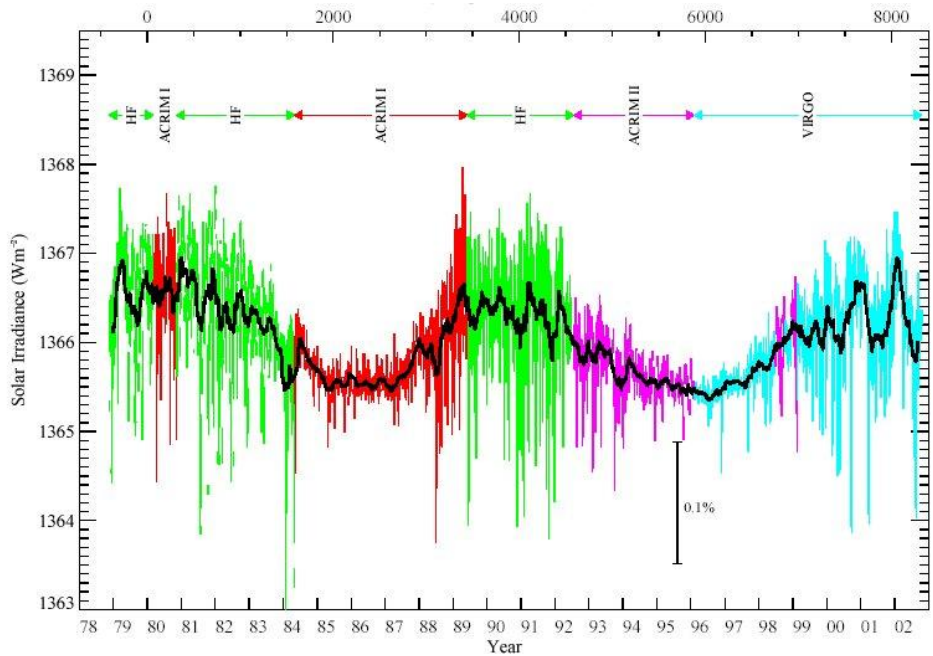
$$AM = \frac{P}{P_0 \sin \theta} \quad (9.2.3.1)$$

где P - атмосферное давление, Па; P_0 - нормальное атмосферное давление ($1,013 \cdot 10^5$ Па); θ - угол высоты Солнца над горизонтом.



Источник: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Sonne_Strahlungsintensitaet.svg

Рисунок 9.2.3.2. Спектральная плотность солнечного излучения.



Источник: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Solar.Constant.Variations.SatData.1978-2003.jpg?1434920491241>

Рисунок 9.2.3.3. Данные прямых измерений солнечной постоянной 1978—2003 гг. Различные цвета соответствуют данным различных спутниковых экспериментов.

Наиболее характерной в земных условиях считается величина $AM = 1,5$ ($\theta = 42^\circ$). Она принята за стандартную при интегральной поверхностной плотности солнечного излучения $E_C = 0,84$ кВт/м², и используется как референсная при исследованиях различных типов солнечных фотоэлементов.

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.

При прохождении СИ через земную атмосферу одновременно происходят три процесса:

1. Отражение СИ обратно в космос облаками и самой атмосферой Земли (около 34%), которое не зависит от длины волны СИ.

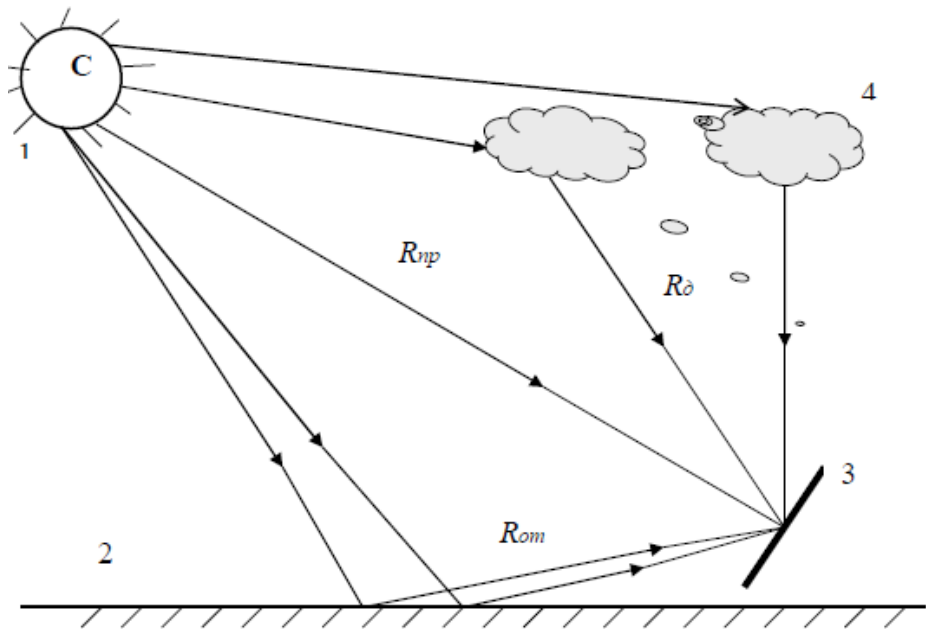
2. Поглощение СИ атмосферой (около 19%), когда энергия СИ переходит в тепло (инфракрасное излучение), излучаемое обратно в космос.

3. Пропускание СИ на поверхность Земли (около 47%); около 20% его отражается от поверхности земли и в виде инфракрасного излучения уходит обратно в космос.

Только 27% всего СИ, поступающего на землю из космоса, преобразуется в энергию, которая идет на испарение и нагрев воды, нагрев атмосферы, образование ветров, волн, течений и т. д. Суммарное солнечное излучение, достигающее поверхности Земли $R_{\Sigma}(t)$, обычно состоит из трех составляющих (рисунок 9.2.3.4, формула 9.2.3.2):

- Прямое солнечное излучение, поступающее от Солнца на приемную площадку в виде параллельных лучей, $R_{np}(t)$.
- Диффузионное или рассеянное молекулами атмосферных газов и аэрозолей солнечное излучение, $R_{\delta}(t)$.
- Отраженная земной поверхностью доля солнечного излучения, $R_{от}(t)$.

$$R_{\Sigma}(t) = R_{np}(t) + R_{\delta}(t) + R_{от}(t) \quad (9.2.3.2)$$



Источник - Виссарионов В.И.

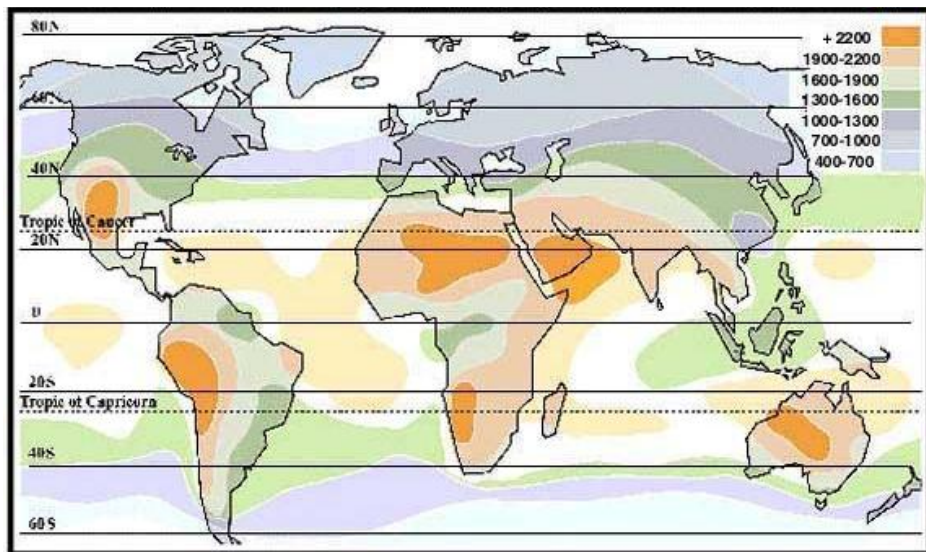
Рисунок 9.2.3.4. Основные составляющие солнечного излучения на поверхности Земли: 1- Солнце, 2 -поверхность Земли, 3 - приемная площадка, 4 - облака, аэрозоли, пыль.

Первая составляющая СИ может отсутствовать полностью или частично в течение как коротких (минуты, часы), так и длительных (сутки, недели) интервалов времени в конкретной точке Земли, поэтому солнечная энергетическая установка (СЭУ) на Земле имеет нулевую гарантированную мощность при использовании только СИ без сочетания с другими источниками энергии. В России, СИ достигает своего максимума в летний период, когда обычно происходит закономерное уменьшение потребления электроэнергии, зимний максимум потребления энергии приходится на период минимального прихода СИ.

Распределение потока солнечного излучения по поверхности Земли неравномерно и достигает максимума в $2200 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$

для северо-запада США, запада Южной Америки, части юга и севера Африки, Саудовской Аравии и Центральной части Австралии (рисунок 9.2.3.5).

На территории России эта величина составляет от 800 до 1400 (кВт*ч)/(м²*год), продолжительность солнечного сияния - от 1700 до 2000 часов в год. Максимум указанных значений на Земле составляет более 3600 часов в год.



Источник: http://www.rusnauka.com/7_NITSB_2013/Tecnic/5_128677.doc.files/image002.jpg

Рисунок 9.2.3.5. Распределение солнечной радиации на поверхности Земли, (кВт*ч)/(м²*год)

9.2.3.2. Классификация солнечных энергетических установок

Солнечная энергия может быть преобразована в тепловую, механическую и электрическую энергию, а также использована в химических и биологических процессах с помощью солнечных энергетических установок (СЭУ). Технологически процессы эти могут иметь существенные отличия, поэтому СЭУ могут быть классифицированы по множеству признаков. Назовем некоторые из них.

1. По виду преобразования и использования СИ в другие виды энергии: в тепловую, механическую, электрическую. Солнечная электроэнергетика в свою очередь подразделяется на электросетевую и автономную. К первой относятся солнечные электростанции (СЭС), входящие в состав электроэнергетической системы (ЭЭС - системы централизованного производства, транспортировки и распределения электроэнергии). В этом случае при небольшом удельном весе (по мощности) СЭС среди традиционных генерирующих источников в энергосистеме не требуется наличия дополнительных аккумулирующих устройств, так как колебания мощности СЭС демпфируются этими источниками.

2. По месту размещения на Земле: наземные и космические. Системы защиты СЭУ у них будут принципиально разные: в космосе - защита ПП от жесткого космического излучения, разрушающего сами ПП; на земле - охлаждение СЭУ, защита от пыли и вандализма в том числе.

3. По стационарности: переносные, передвижные и стационарные СЭУ. Отличаются друг от друга как по массо-габаритным характеристикам, так и по сложности конструктивного исполнения. Существенно отличаются друг от друга по показателям надежности.

4. По виду ориентации на солнце: с постоянной (неизменной) ориентацией на поверхности земли и с системой слежения за Солнцем с целью максимизации прихода СИ на поглощающую поверхность. К первым относятся, как правило, энергоустановки бытового назначения, размещенные на крышах строений, на земле под постоянным углом к горизонту и на специальных стационарных конструкциях-каркасах для размещения СЭУ. Для небольших, простых СЭУ возможно изменение угла наклона в каждом месяце года, что достаточно просто может быть реализовано конструктивно.

5. По технической сложности СЭУ: простые и сложные по техническому циклу и исполнению. К первым можно отнести: нагреватели воды и воздуха различной конструкции; сушилки продуктов сельского хозяйства; опреснители воды; теплицы и т.д. и т.п.

Сложные СЭУ можно разделить на два вида по используемому принципу преобразования солнечной энергии. Фотоэлектрические – которые реализуют метод прямого (безмашинного) преобразования солнечной энергии в электрическую, и термодинамические, в которых лучистая энергия преобразуется сначала в тепло, которое в термодинамическом цикле тепловой машины в свою очередь преобразуется в механическую энергию, а затем в генераторе в электрическую (башенные солнечные электрические станции, солнечные энергетические установки с параболоцилиндрическими концентраторами, солнечные коллекторы и т.д.).

В России наиболее перспективным можно считать использование:

- солнечных фотоэлектрических преобразователей;
- солнечных коллекторов.

В соответствии с приведенной выше классификацией первые относятся к солнечной электроэнергетике, вторые к солнечной

теплоэнергетике. Ниже рассмотрим основные физические принципы преобразования солнечной энергии в таких установках.

9.2.3.3 Солнечная электроэнергетика.

9.2.3.3.1 Фотоэлектрические преобразователи

Полупроводниковые устройства, прямо преобразующие солнечную энергию в постоянный электрический ток называют фотоэлектрическими преобразователями (фотоэлементами). Несколько таких фотоэлементов, объединенных вместе для выработки электрической энергии, называют солнечной фотоэлектрической установкой (СФЭУ) или, солнечной батареей.

Начальной точкой развития солнечных батарей является 1839 год, когда Эдмондом Беккерелем был открыт фотогальванический эффект. В 1922 году Эйнштейн получил Нобелевскую премию за изучение особенностей внешнего фотоэффекта, а в 30-х годах советские физики за счет использования фотоэффекта получили электрический ток. К 1989 году была изготовлена солнечная батарея с КПД больше 30%.

Суть фотоэффекта состоит в том, что электроны некоторых веществ (например, кремния) способны поглощать энергию солнечных лучей. В результате электроны покидают свои орбиты. При этом существует наименьшая частота, ниже которой энергии фотона уже недостаточно, чтобы освободить электрон. Она называется красной границей фотоэффекта. Если при этом в веществе действует электрическое поле, электроны образуют направленный поток свободных носителей заряда. Этот направленный поток электронов и будет постоянным фототоком.

В местах переходов или неоднородностей материала существуют внутренние электростатические поля и для структур полупроводник - полупроводник или металл - полупроводник они

позволяют создать разность потенциалов около 0,5 В и плотность тока порядка 200 А/м при плотности потока солнечного излучения около 1 кВт/м.

Наибольшее распространение в современной солнечной энергетике получили полупроводниковые преобразователи из химически чистого кристаллического кремния, который широко распространен в земной коре элемент в форме диоксида кремния - песка и кварца.

Проводимость полупроводников существенно меняется под влиянием внешних факторов. Напомним, что в обычном состоянии атомы кремния образуют кристаллическую *решетку*. На внешней электронной оболочке атома находятся четыре электрона. Каждый из них принадлежит двум атомам одновременно, образуя ковалентную связь и в результате у каждого атома на внешней электронной оболочке находится восемь электронов. Последний уровень электронной оболочки оказывается завершенным, поэтому у атома очень трудно забрать его электроны и материал ведет себя как диэлектрик.

Для повышения проводимости их специально загрязняют примесями – атомами химических элементов с другим значением валентности. Примеси с меньшим количеством валентных электронов, чем у полупроводника, называются *акцепторами*. Примеси с большей валентностью – *донорами*. Сам этот процесс называется *легированием* полупроводников. Примерное соотношение - один атом примеси на миллион атомов полупроводника.

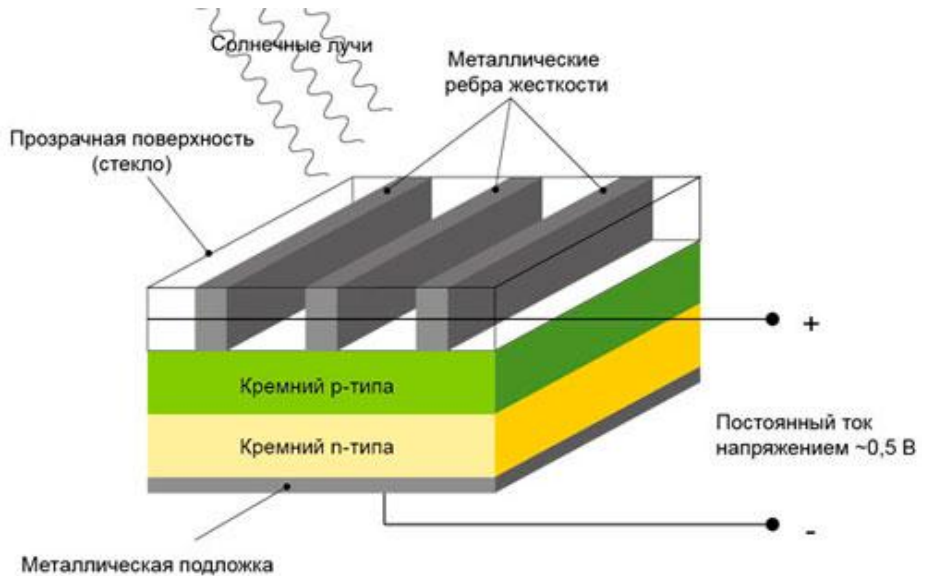
Если добавить в полупроводник кремния пятивалентный атом (например, мышьяк - As), то для пятого валентного электрона не останется пары, и он станет слабо связанным с атомом. Под действием электромагнитного поля, такой электрон легко

отрывается, а атом, потерявший электрон, превращается в положительно заряженный ион с наличием свободной вакансии - дырки. Основными носителями свободного заряда становятся электроны, проводимость называют электронной, а полупроводник - полупроводником N-типа.

Если добавить в полупроводник кремния трехвалентный атом (например, индий - In), то он установит ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами кремния. Недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из связи соседних атомов кремния. Атом индия превратится в негативно заряженный ион, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия (дырка). В свою очередь, на это место может перескочить электрон из соседней ковалентной связи. В результате получается хаотическое блуждание дырок по кристаллу. При наличии внешнего электромагнитного поля, движение дырок станет упорядоченным, т.е. возникнет электрический ток. Такая проводимость называется дырочной, полупроводник - полупроводником P-типа.

Соединив вместе материалы P-типа и N-типа, на их стыке мы получим область электронно-дырочного перехода (PN -перехода). Именно благодаря ему возможно разделение зарядов и работа фотоэлемента.

Рассмотрим конструкцию и принцип действия простейшего солнечного элемента на основе кремния (рисунок 9.2.3.6). На малой глубине от поверхности кремниевой пластины P-типа сформирован PN - переход с тонкими металлическими контактами; на тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт.



Источник: <http://solarb.ru/node/835>

Рисунок 9.2.3.6. Устройство фотоэлемента

При попадании солнечного света на поверхность фотоэлемента, между двумя типами кремния возникает разница так называемых потенциалов или электрическое напряжение. При подключении к элементу нагрузки сила тока возрастает пропорционально яркости солнечного света, вплоть до определенного критического значения. При усилении интенсивности освещения сила тока достигает максимума и выравнивается. Такой максимум называется током насыщения.

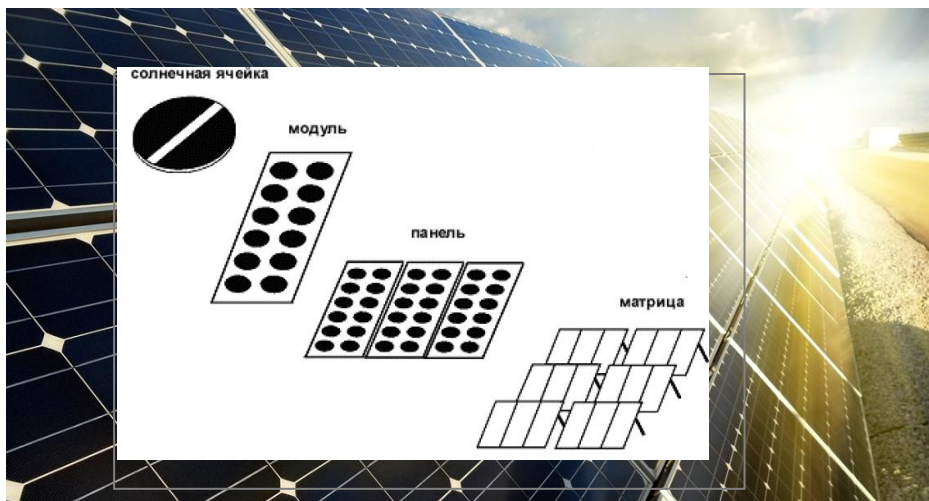
Когда фотоэлемент освещается, поглощенные фотоны генерируют неравновесные электронно-дырочные пары. Электроны Р-слоя вблизи PN-перехода, подходят к PN-переходу и выносятся в п-область существующим в нем электрическим полем. Аналогично и избыточные дырки, созданные в N-слое, частично переносятся в Р-слой. В результате N-слой приобретает дополнительный отрицательный заряд, а Р-слой - положительный. Снижается

первоначальная контактная разность потенциалов между Р- и N-слоями полупроводника, и во внешней цепи появляется напряжение. Отрицательному полюсу источника тока соответствует N-слой, а Р-слой - положительному.

При использовании солнечного элемента в качестве источника электроэнергии к его выводам должно быть подсоединено сопротивление нагрузки R_H . В двух крайних случаях, $R_H = 0$ (режим короткого замыкания) и $R_H = \infty$ (режим холостого хода), мощность, генерируемая фотоэлементом будет равна нулю, поскольку равны нулю либо I_H , либо U_H . В промежуточных режимах электрическая мощность, выделяемая в нагрузке, определяется по формуле:

$$P = I_H \cdot U_H = I_\phi \cdot U_H - I_0 \cdot U_H \cdot e^{\left(\frac{q \cdot U_H}{AkT}\right)} \quad (9.2.3.3)$$

Фотоэлементы можно объединить последовательно-параллельно, повышая тем самым общую мощность. При последовательном соединении элементов увеличивается напряжение, параллельном – суммарный ток. Последовательно соединенные фотоэлементы (ячейки) образуют фотоэлектрический модуль, а несколько модулей, соединенных параллельно – фотоэлектрическую панель, или солнечную батарею (рисунок 9.2.3.9).



Источник: http://www.innoros.ru/sites/default/files/1217_0.jpg

Рисунок 9.2.3.7. Солнечные батареи из объединенных фотоэлементов.

Особенности строения фотоэлементов вызывают снижение производительности панелей с ростом температуры.

Частичное затемнение панели вызывает падение выходного напряжения за счёт потерь в неосвещённом элементе, который становится паразитной нагрузкой. От данного недостатка можно избавиться путём установки байпасного диода на каждый фотоэлемент панели.

Для достижения наибольшей эффективности требуется правильный подбор сопротивления нагрузки. Для этого фотоэлектрические панели не подключают напрямую к нагрузке, а используют контроллер управления фотоэлектрическими системами, обеспечивающий оптимальный режим работы панелей.

Отношение вырабатываемой электроэнергии к силе света падающего на фотоэлемент называется коэффициентом преобразования или коэффициентом полезного действия (КПД). Он

будет определяться произведением КПД отдельных этапов преобразования (рисунок 9.2.3.8)

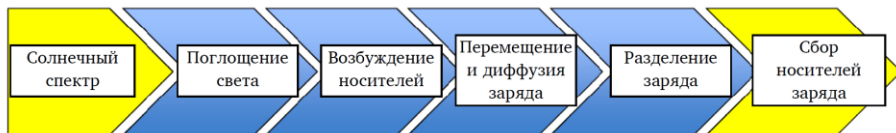


Рисунок 9.2.3.8. Общий КПД фотоэлемента

$$\eta_{\text{общий}} = \eta_{\text{поглощение}} \cdot \eta_{\text{возбуждение}} \cdot \eta_{\text{перемещение}} \cdot \eta_{\text{разделение}} \cdot \eta_{\text{сбор}} \quad (9.2.3.4)$$

В солнечных батареях генерация электрического тока напрямую зависит от интенсивности солнечного излучения, а значит от её суточных, сезонных и случайных изменений. Для определения и сравнения номинальной мощности солнечных панелей, выходная мощность измеряется при стандартных тестовых условиях (СТУ). Эти условия предполагают:

- освещенность 1000 Вт/м^2
- солнечный спектр АМ 1.5 (он определяет тип и цвет света)
- температура элемента 25°C .

Так как в реальных условиях работы такие параметры практически недостижимы, в последнее время все больше производителей указывают параметры модуля в так называемых "нормальных условиях" (NTC), т.е. при температуре модуля $40\text{-}45^\circ\text{C}$ и освещенности 800 Вт/м^2 .

Существует множество видов фотоэлементов, но все они должны удовлетворять следующим техническим требованиям:

1. Химически чистый исходный материал с устойчивыми свойствами.
2. Минимальная стоимость фотоэлементов при массовом производстве при высоком уровне и точности изготовления.

3. Срок службы не менее 20 лет в условиях воздействия окружающей среды. Диапазон рабочих температур от -30 до +200 °С. Защищенные от коррозии электрические контакты, влагозащита.

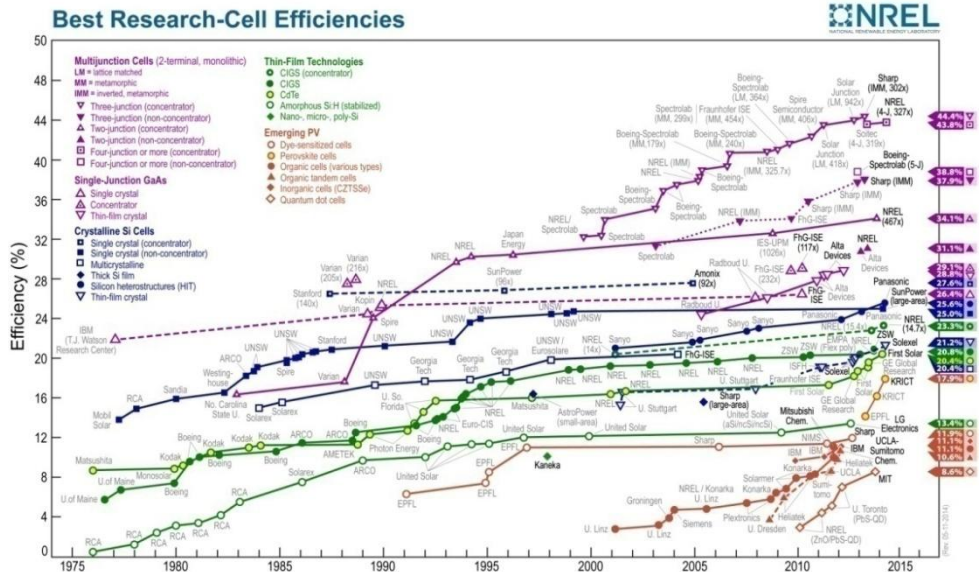
4. Разрушение одного из элементов не должно приводить к выходу системы из строя (последовательно-параллельное соединение элементов).

5. Пригодность для транспортировки модулей в труднодоступные и отдаленные районы.

Конструкции и материалы фотоэлектрических преобразователей

Производство структур на основе **монокристаллического кремния** – процесс технологически сложный и дорогостоящий. Поэтому поиск новых материалов, таких как сплавы на основе аморфного кремния, арсенид галлия, поликристаллические полупроводники и некоторые другие не прекращается.

Рисунок 9.2.3.9 показывает достигнутую эффективность современных фотоэлементов, изготовленных по различным технологиям, как уже нашедшим промышленное применение, так и перспективным. КПД производимых в промышленных масштабах фотоэлементов в среднем составляет 16%, у лучших образцов до 25%. В лабораторных условиях уже достигнуты КПД 43,5%, 44,4%, 44,7%. Рассмотрим наиболее распространенные из существующих технологий.



Источник: NREL

Рисунок 9.2.3.9. Эффективность различных технологий фотоэлементов.

Аморфный кремний был разработан в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому. Первые СЭ на его основе были созданы в 1975 году. Тонкие пленки аморфного кремния наиболее часто получают методом осаждения из паровой фазы с использованием плазмы. Температура осаждения 250-400 °С, что позволяет использовать в качестве подложек не только металлические ленты, но также стекло и даже полимерные пленки. В случае гибких подложек, таких как металлические или полимерные ленты, осаждение может проводиться в непрерывном процессе при протяжке ленты-подложки через реактор. Эта технология отличается высокой производительностью, а пленки – соответственно низкой стоимостью. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического, поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки аморфного кремния

толщиной 0,5–1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых 300-мкм подложек.

Пока максимальный КПД экспериментальных элементов на основе аморфного кремния около 12% – несколько ниже КПД кристаллических кремниевых СЭ (~15%). Однако не исключено, что с развитием технологии КПД таких элементов достигнет теоретического – 16 %.

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

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

Главное достоинство таких элементов – широкий диапазон возможностей для проектирования СЭ. Фотоэлемент на основе GaAs может состоять из нескольких слоев различного состава. Это позволяет с большой точностью управлять генерацией носителей заряда, что в кремниевых солнечных элементах ограничено допустимым уровнем легирования. Основной недостаток арсенида галлия – высокая стоимость. Для удешевления производства предлагается формировать СЭ на более дешевых подложках;

выращивать слои GaAs на удаляемых подложках или подложках многократного использования.

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 этого материала (ширина запрещенной зоны – 1,0 эВ). Современный рекорд эффективности для лабораторных устройств на основе CIS с добавлением Ga составляет 19,5%, что превышает эффективность элементов на поликристаллическом кремнии. Модули коммерческого размера имеют эффективность более 13%.

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 (~90%). 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. Такие СЭ обладают высокими значениями КПД, от 10 до 16%.

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

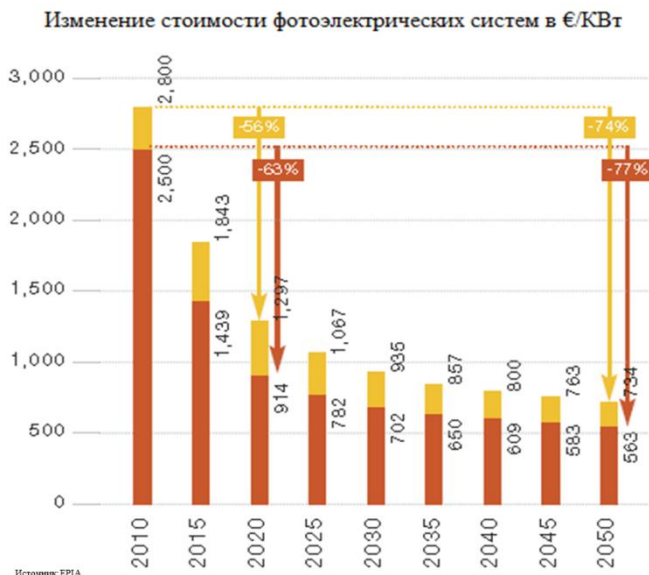
Несмотря на то, что эффективность преобразования органических фотоэлементов выглядит довольно скромно по сравнению с неорганическими фотоэлементами, эти устройства имеют малый расход и низкую стоимость материалов, экологическую безопасность и дешевую утилизацию, очень низкую стоимость производства, гибкость модулей и связанное с этим удобство транспортировки и монтажа.

Основа СЭ данного типа – широкозонный полупроводник, обычно TiO_2 , покрытый монослоем органического красителя. Принцип работы элемента основан на фотовозбуждении красителя и быстрой инжекции электрона в зону проводимости TiO_2 . Молекула красителя окисляется, через элемент идет электрический ток и на платиновом электроде происходит восстановление трийодида до иодида. Затем иодид проходит через электролит к фотоэлектроду, где восстанавливает окисленный краситель.

Ниже, в таблице 9.2.3.2 приведены основные особенности и отличия в применении тонкопленочных и кристаллических фотоэлектрических модулей.

За последние 40 лет стоимость кремниевых фотоэлектрических преобразователей снизилась в 40 раз, 1 кВт установленной мощности на фотоэлектрических солнечных электростанциях обходится в 2000 - 2500 долларов США и имеет тенденции к дальнейшему снижению (рисунок 9.2.3.10).

Использование фотоэлектрических солнечных электростанций начиналось с космической техники, где стоимость играла второстепенную роль. «Крылья» фотоэлементов космической станции «Мир» имели площадь в сотни квадратных метров. На Луне больше года работал луноход, питаемый от солнечных батарей. На американской станции «Скайлэб» батарея общей площадью 130 м обеспечивала энергопитание мощностью 10,5 кВт.



Источник: International Solar Energy Society

Рисунок 9.2.3.10. Прогноз изменения стоимости фотоэлектрических систем в €/кВт.

В наше время модули фотоэлектрических преобразователей производятся в ряде стран для нужд большой энергетики. Мощности одиночных солнечных установок этого типа в США достигли 10 МВт, причем пик мощности достигается, когда Солнце находится в зените - близко к тому времени, когда суточный ход потребления энергии в солнечных южных субтропических штатах Америки имеет максимум в связи с работой кондиционеров.

Крупнейшая в мире фотоэлектрическая станция Topaz Solar Farm, предназначенная для промышленной выработки электроэнергии расположена в США и имеет установленную мощность 500 МВт по состоянию на июнь 2014 г (рисунок 9.2.3.11).

Очень важным преимуществом фотоэлектрических солнечных электростанций являются очень малые эксплуатационные затраты -

модули, защищенные от пыли и атмосферных осадков стеклом или пленкой, работают десятки лет без обслуживания.

Следует ожидать, что в южных солнечных регионах России при массовом выпуске и снижении стоимости фотоэлектрических модулей такие установки окажутся конкурентоспособными в сравнении с традиционными, работающими на дорожающем органическом топливе.



Источник: <http://www.theplaidzebra.com/worlds-largest-solar-farm/>

Рисунок 9.2.3.11. Фотоэлектрическая станция Topaz Solar Farm мощностью 500 МВт.

Таблица 9.2.3.2. Особенности в применении тонкопленочных и кристаллических фотоэлектрических модулей.

Технология	Кристаллический кремний	Тонкопленочные модули
Разновидности технологии	Монокристаллический кремний (c-Si) Поликристаллический кремний (p-c-Si/ mc-Si) String Ribbon	Аморфный кремний (a-Si) Теллурид кадмия (CdTe) Copper Indium Gallium Selenide (CIG/ CIGS) Органические фотоэлементы (OPV/ DSC/ DYSC)
Отношение напряжения	80%-85%	72%-78%

в рабочей точке к напряжению холостого хода (V_{mp}/V_{oc})		
Температурные коэффициенты (низкий температурный коэффициент лучше при работе при высоких температурах окружающей среды)	выше (-0,4-0,5%/градус)	ниже (-0,1-0,2%/градус)
Заполнение вольт-амперной характеристики (идеальный элемент имеет 100% заполнение)	73%-82%	60%-68%
Конструкция модуля	в раме из анодированного алюминия	без рамы, между 2 стеклами - цена ниже, вес больше на гибком основании - легче, дешевле
КПД модуля	13%-19%	4%- 12%
Совместимость с инверторами	Чем меньше температурный коэффициент, тем лучше. Можно использовать бестрансформаторные инверторы	Проектировщик должен учитывать такие факторы, как температурный коэффициент, отношение V_{oc}/V_{mp} , сопротивление изоляции и т.п. Обычно для тонкопленочных модулей требуется инвертор с гальванической развязкой
Монтажные конструкции	Типовые	Типовые, но может потребоваться специальные зажимы или крепеж. Во многих случаях стоимость установки намного меньше
Типовое применение	Жилые дома / Коммерческие объекты / Генерация в сеть	Жилые дома / Коммерческие объекты / Генерация в сеть
Требуемая площадь	около 150 Вт/м ²	может потребоваться до 50% больше площади для той же мощности

9.2.3.3.2 Термоэлектрические преобразователи

Использование термоэлектрических преобразователей для выработки электрической энергии в промышленных масштабах на сегодняшний день малоперспективно, но они получили широкое распространение в качестве автономных источников электроэнергии для потребителей малой мощности - маяков, морских сигнальных буйев и т. п. Рассмотрим принцип работы такого рода преобразователей.

Еще в 1821 г. Зеебеком было открыто явление, названное его именем, заключающееся в том, что в состоящей из разных проводниковых материалов замкнутой цепи появляется э. д. с. (так называемая термо-э.д.с.), если места контакта этих материалов поддерживаются при разных температурах.

Горячий спай за секунду поглощает теплоту из нагретого источника в количестве $Q_1 = \alpha * T_1 * I$, а холодный спай отдает теплоту низкотемпературному телу в количестве $Q_2 = \alpha * T_2 * I$, в цепи возникает ток I . Разность подведенной и отведенной теплоты составляет секундную работу тока.

Термический КПД процесса преобразования совпадает с термическим КПД цикла Карно и полностью определяется абсолютными температурами холодного и горячего спаев.

При использовании термоэлектродов из металла КПД преобразователей очень мал - сотые доли процента. При использовании термоэлектродов из полупроводников - КПД возрастает до величины порядка 10 %.

9.2.3.3.3 Термодинамические СЭС

Термодинамические СЭС (ТСЭС) основаны на нагревании теплоносителя солнечным излучением с помощью специальных оптических систем с дальнейшим преобразованием тепловой

энергии в механическую и далее в электрическую. Наибольшее распространение получили следующие три типа ТЭС:

1. тарелочного типа, у которых в фокусе параболического тарелочного зеркала расположен приемник солнечной энергии с теплоносителем;
2. параболического (лоточного) типа, в которых в фокусе параболоцилиндричных концентраторов размещаются вакуумные приемники-трубы с теплоносителем (парогенератор);
3. башенного типа с центральным приемником-парогенератором, на поверхности которого концентрируется солнечное излучение от плоских зеркал-гелиостатов.

Принципиальная схема получения электрической энергии с помощью СЭС представлена на рисунке 9.2.3.12.

Рабочим телом в коллекторах в большинстве случаев является вода или водоспиртовой раствор с целью предотвращения замерзания жидкости в коллекторах внешних установок в зимнее время. Иногда в качестве теплоносителя используются различные химические вещества с высокой теплоемкостью и температурой кипения (например, натрий, диссоциированный аммиак, углеводородный оксид дифениля и др.). В последнем случае в состав СЭС входит теплообменник, предназначенный для получения водяного пара во вторичном контуре.

В большинстве случаев солнечные тепловые электростанции являются гибридными, т. е. имеют дополнительный источник энергии на традиционном топливе для выработки электрической энергии при отсутствии солнечного излучения (на протяжении суток).

Эффективность использования излучения, которое падает на приемник, составляет от 20 до 35 %, произведенная электроэнергия составляет от 10 до 30 % эффективного падающего излучения.

Производство электроэнергии в крупных масштабах с помощью ТЭС конкурентоспособно. Промышленное применение этой технологии берет свое начало в 1980-х; с тех пор эта отрасль быстро развивалась. По состоянию на 2013 год общая установленная мощность ТЭС в мире составляет уже более 3,4 ГВт. В частности во многих районах США эта технология является настолько развитой, что, по официальным сведениям, может соперничать с традиционными электрогенерирующими технологиями.

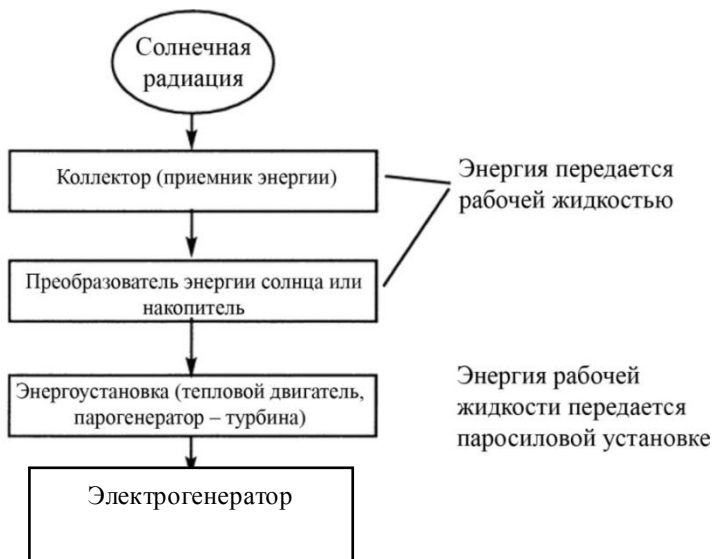


Рисунок 9.2.3.12. Принципиальная блок-схема гелиоэнергетической установки

Башенные СЭС.

Станции башенного типа состоят из пяти основных элементов (рисунок 9.2.3.13):

- оптической системы;
- автоматической системы управления оптической системой и станцией в целом;
- системы парогенератора;
- системы башни, которая удерживает гелиоприемник;
- системы преобразования энергии, которая включает теплообменники, аккумуляторы энергии и турбогенераторы.

Идея башенной СЭС (БСЭС) существует почти 400 лет. Практическая же реализация БСЭС началась с 1965 г.

Оптическая система станции представляет собой устройство, которое концентрирует солнечную радиацию (концентраторы) на вершине башни с котлом – приемником СИ. Тут образуется пар – теплоноситель, который далее поступает напрямую или через дополнительный контур теплового аккумулятора в паровую турбину. На одном валу с паровой турбиной размещается ротор генератора, вырабатывающего электрический ток заданного напряжения и частоты.

Концентраторы могут быть линзовыми и зеркальными, но в настоящее время используются только вторые. Получаемая на вершине башни при их использовании температура, составляет от 300 до 1500 °С.

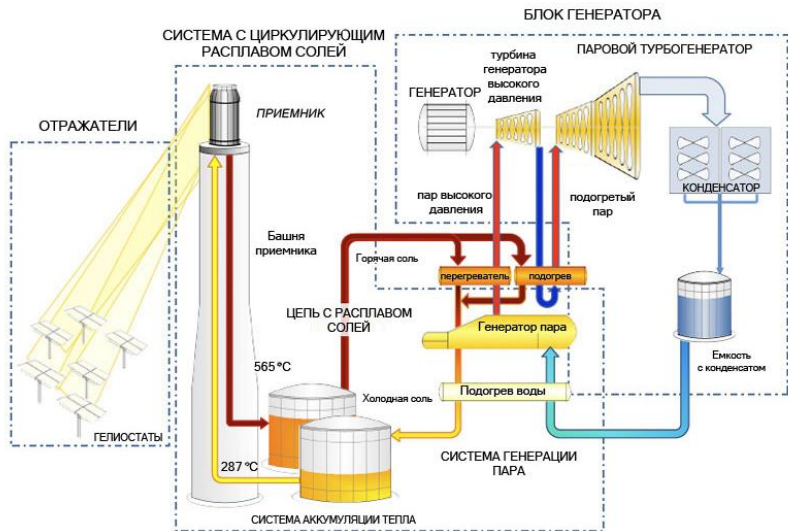
Мощность одного модуля не превышает 200 МВт, что связано со снижением эффективности перенесения энергии от наиболее отдаленных концентраторов на вершину башни. Поэтому мощность БСЭС во многом определяется высотой башни (высокая башня исключает эффект взаимного затенения гелиостатов). Для мощности БСЭС в $50 \div 100$ МВт, которая считается оптимальной, требуемая высота башни - порядка $200 \div 300$ м с используемой площадью полем гелиостатов в $2 \div 3$ км² (около $15 \div 25$ тысяч). Для БСЭС мощностью

150 ÷ 200 МВт требуется башня высотой 350 ÷ 400 м, что пока сложно реализуемо на практике.

Так как оптические приспособления эффективно концентрируют только прямое солнечное излучение, большое значение имеет ориентация зеркала и гелиоприемника относительно Солнца. Поэтому концентрирующие гелиосистемы должны иметь систему слежения за Солнцем, при этом каждый из гелиостатов ориентируется в пространстве по индивидуальным законам.

Во время перерывов в получении солнечной радиации, т. е. при прекращении производства пара в парогенераторе, система поддерживается в рабочем состоянии благодаря энергии, накопленной в тепловом аккумуляторе, которые для современных БСЭС могут обеспечить автономную работу на период до 15-20 часов. Схема такой БСЭС приведена на рисунке 9.2.3.13.

Мировая практика эксплуатации станций башенного типа показала их техническую целесообразность и работоспособность. Основным недостатком башенных солнечных электростанций (СЭС) является их высокая стоимость и значительная площадь, которую они занимают. Для размещения СЭС мощностью 100 МВт необходима площадь 200 га, а для АЭС мощностью 1000 МВт – всего 50 га.



Источник: <http://www.gadgetblog.ru/4313/>

Рисунок 9.2.3.13 Схема башенной СЭС с тепловым аккумулятором

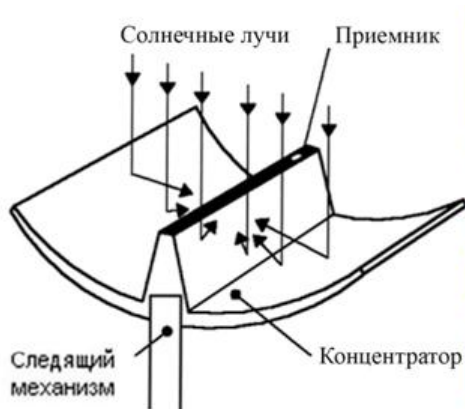


Источник: <http://califomista.livejournal.com/16377.html>

Рисунок 9.2.3.14. Вид на Иванпа Солар Электрик Систем.

По состоянию на июнь 2014 г крупнейшей СЭС такого типа является пущенная в эксплуатацию весной 2014 г Иванпа Солар Электрик Систем (рисунок 9.2.3.14) в пустыне Мохаве мощностью 392 МВт.

Параболо-цилиндрические концентраторы. Концепция параболического желоба – это пример наибольшей степени упрощения механизма концентрации солнечного излучения в линейных сфокусированных приемниках энергии (приемных трубках) расположенных вдоль желоба. Жидкость-теплоноситель в них нагревается почти до 400 °С и прокачивается через ряд теплообменников; выработанный при этом перегретый пар, используется для производства электричества в обычном турбогенераторе (рисунок 9.2.3.15).



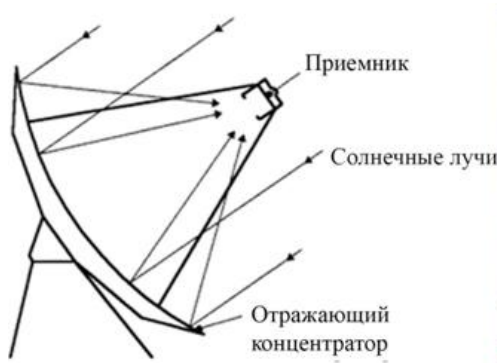
Источник: <http://www.gensetsupplier.ru/4-solar-power-technology.html>

Рисунок 9.2.3.15. Параболо-цилиндрические концентраторы.

Для снижения тепловых потерь приемную трубку можно располагать в середине стеклянной трубки, которая размещается вдоль фокусной линии параболического зеркала. Станции параболического все более широко применяются в связи с более

простой системой слежения (одноосная или двухосная) за Солнцем и меньшей металлоемкостью.

Концентраторы тарельчатого типа. В качестве концентратора такие гелиоустановки используют батарею параболических тарелочных зеркал. Приемники располагаются в фокусе каждой тарелки (рисунок 9.2.3.16). Теплоноситель нагревается до температуры порядка 1000 °С и используется для производства электричества в небольшом генераторе, соединенном с приемником.



Источник: <http://aenergy.ru/37>

Рисунок 9.2.3.16. Концентраторы тарельчатого типа.

Наибольшую производительность, благодаря высокой оптической эффективности и сравнительно небольшим капитальным затратам, имеют двигатели Стирлинга и Брайтона. Установки имеют системы слежения за Солнцем. Ввиду эффекта абберации в связи с отклонением тарелок от идеальной формы максимальный диаметр тарелок не превышает 20 м.

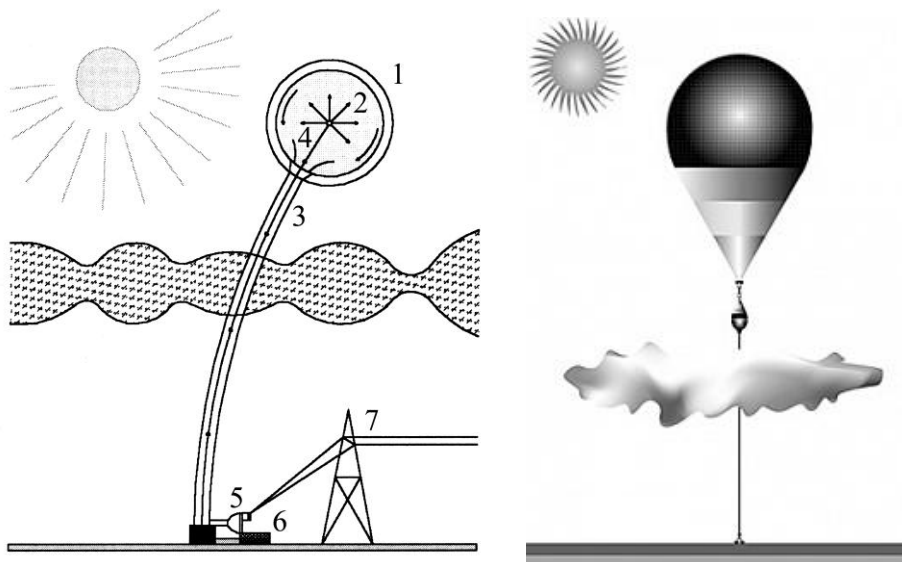
В среднем мощность одной установки составляет от 7 до 25 кВт, в 2010 году в США была запущена экспериментальная станция общей мощностью 1,5 МВт. Наивысший практически достигнутый КПД преобразования солнечной энергии в электрическую, такой системы составляет 29 %.

Благодаря модульному проектированию такие системы являются оптимальными для удовлетворения потребностей в электроэнергии как для автономных потребителей (в киловаттном диапазоне), так и для гибридных (в мегаваттном диапазоне), соединенных с электрическими сетями коммунальных предприятий.

Следует отметить, что минимальная удельная площадь для станций тарелочного типа составляет $15 \text{ м}^2/\text{кВт}$, для башенных и параболических мощностью – соответственно 20 и $25 \text{ м}^2/\text{кВт}$.

Солнечная аэростатная электроэнергетика. В ближайшем будущем экономически перспективными могут стать так называемые аэростатные электростанции (рисунок 9.2.3.17). Аэростат с диаметром оболочки 150 м поднимается на высоту 5000 м, чтобы быть над уровнем облачности при непрерывном воздействии солнечного излучения на протяжении дневной части суток. Оболочка аэростата двуслойная, на внутренний слой нанесено покрытие, которое поглощает солнечное излучение и нагревается до температуры 200°C и выше. Между слоями находится воздух, который пропускает солнечное излучение к внутреннему слою и тепло изолирует его от внешней среды.

Водяной пар нагревается при контакте с поглощающей оболочкой. При атмосферном давлении на уровне моря температура насыщения равна 100°C , поэтому пар внутри баллона при температуре $130\text{--}150^\circ\text{C}$ оказывается перегретым. Если в нем распылить воду, вода испаряется. Таким простым и эффективным способом происходит генерация пара внутри баллона.



1 – прозрачная оболочка; 2 – поглощающая оболочка; 3 – паропровод;

4 – трубопровод с водяными насосами; 5 – паровая турбина;

6 – конденсатор; 7 – линия электропередачи

Источник: <http://market.elec.ru/nomer/7/aeroenergy/>

Рисунок 9.2.3.17. Принципиальная схема аэростатной солнечной электростанции с паровой турбиной

Водяной пар с оболочки подается по гибкому паропроводу к паровой турбине, которая расположена на поверхности земли. Недостаток водяного пара в оболочке компенсируется водой, которая подается каскадом насосов с конденсатора паровой турбины и в середине аэростата распыляется и испаряется. При температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и плотности водяного пара $0,3\text{ кг/м}^3$ аэростат диаметром 150 м может поднять на высоту 5 км груз массой 700 кг. За ночной период за счет охлаждения окружающим воздухом подъемная сила аэростата снижается на 10-20 %, но это не отражается на его положении. А запасы водяного пара во внутренней части аэростата достаточны для бесперебойной работы турбины в ночные часы суток.

Возможная мощность турбогенератора в рассмотренной схеме, составляет 2000 кВт, при этом можно изменять мощность турбогенератора на протяжении суток согласно потребностям потребителя.

Сравнительные характеристики и перспективы

Башни и параболоцилиндрические концентраторы оптимально использовать для комплектования крупных электростанций мощностью 30-200 МВт в составе энергосистемы, тогда как системы тарельчатого типа состоят из модулей и могут использоваться как в автономных установках, так и группами общей мощностью в несколько мегаватт. Параболоцилиндрические установки - на сегодня наиболее развитая из солнечных энергетических технологий и именно они, вероятно, будут использоваться в ближайшей перспективе. Аэростатные СЭС пока лишь концепция. Электростанции башенного типа, благодаря своей эффективной теплоаккумулирующей способности, также могут стать солнечными электростанциями недалекого будущего. Башни и “тарелки” позволяют достичь более высоких значений КПД превращения солнечной энергии в электрическую при меньшей стоимости, чем у параболических концентраторов. Однако, остается неясным, смогут ли эти технологии достичь необходимого снижения капитальных затрат. Параболические концентраторы в настоящее время - уже апробированная технология, которая продолжает совершенствоваться. Башенные электростанции нуждаются в демонстрации эффективности и эксплуатационной надежности технологии расплавленных солей при использовании недорогих гелиостатов. Для систем тарельчатого типа необходимо создание хотя бы одного коммерческого двигателя и разработка недорогого концентратора.

Преимущества и недостатки термодинамических СЭС, а также их характеристики приведены в таблицах 9.2.3.3, 9.2.3.4.

Таблица 9.2.3.3. Сравнение основных солнечных тепловых технологий

	Параболический концентратор	Концентраторы тарельчатого типа	Электростанция башенного типа
Где применяется	Станции в составе энергосистемы; техническое тепло для промышленных процессов.	Небольшие автономные энергоустановки; поддержка сети	Соединенные с сетью электростанции; техническое тепло для промышленных процессов
Преимущества	Диспетчеризация пиковой нагрузки; опыт работы на коммерческом рынке; гибридная система (солнечная энергия/ископаемое топливо).	Диспетчеризация нагрузки, высокий коэффициент преобразования; модульность; гибридная система (солнечная энергия/ископаемое топливо).	Диспетчеризация базовой нагрузки; высокий коэф. преобразования; аккумулирование тепла; гибридная система (солнечная энергия/ископаемое топливо).

Таблица 9.2.3.4. Характеристики солнечных тепловых электростанций

	Параболический концентратор	"Тарелка"	Электростанция башенного типа
Мощность	30-320 МВт	5-25 МВт	10-200 МВт
Рабочая температура (С/°F)	390/734	750/1382	565/1049
Коэффициент готовности	23-50 %	25 %	20-77 %
Пиковый КПД	20%(ф)	29.4%(ф)	23%(п)

Практический годовой КПД	11(ф)-16%	12-25%(п)	7(ф)-20%
Промышленное применение	Прототип, пропорциональный промышленной установке	В стадии демонстрации	Существующие демонстрационные проекты
Риск, связанный с развитием технологии	Низкий	Высокий	Средний
Аккумулирование тепла	Ограничено	Аккумулятор	Да
Гибридные системы	Да	Да	Да
Стоимость, доллар/Вт	2,7-4,0	1,3-12,6	2,5-4,4

(п) = прогноз; (ф) = факт;

9.2.3.4 Солнечная теплоэнергетика

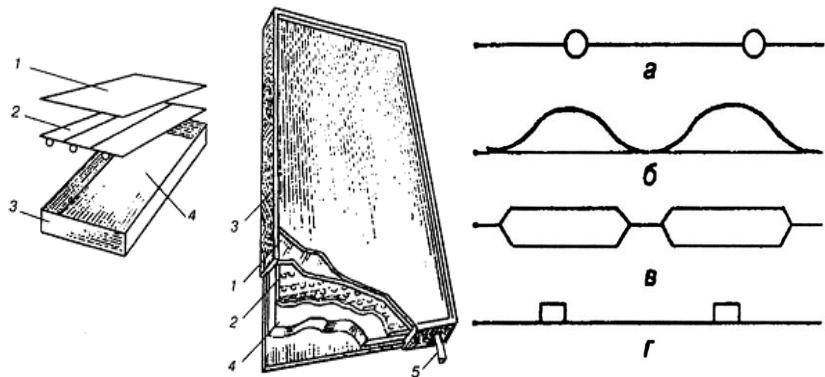
Системы солнечного теплоснабжения предназначены для обеспечения теплом индивидуальных и многоквартирных жилищных зданий, лечебно-оздоровительные организаций, фермерских хозяйств, дачных участков, плавательных бассейнов, а также для производственных процессов в промышленности и сельском хозяйстве.

Солнечный коллектор – устройство, в котором происходит улавливание солнечной радиации, ее преобразование в теплоту и нагревание теплоносителя. На сегодняшний день широко используются плоские коллекторы, особенностью которых является то, что они преобразуют в теплоту как прямое, так и рассеянное излучение. Они не требуют использования сложных систем наблюдения за Солнцем.

Плоский коллектор солнечной энергии представляет собой коробку, которая имеет теплоизоляцию и закрыта сверху прозрачной герметической крышкой (остекление). В середине ящика размещается абсорбер – плоская пластина, верхняя часть которой покрашена в черный цвет для лучшего поглощения солнечного излучения (рисунок 9.2.3.18). Абсорбер имеет специальную изогнутую форму для образования каналов для теплоносителя – трубок круглого или прямоугольного сечения.

В обычных плоских коллекторах почти невозможно получить температуру теплоносителя выше 100 °С, так как с повышением его температуры существенно повышаются потери тепловой энергии теплопроводностью и конвекционными перетоками слоев воздуха, который находится между абсорбером и стеклянным покрытием корпуса. Для снижения потерь этот зазор заполняют прозрачной сотовой структурой из пластмассы в виде протяженных ячеек, напоминающие пчелиные соты, что позволяет нагревать жидкий теплоноситель до температуры 200-250 °С. Более высокие температуры в 250-300 °С можно получить, если поместить стеклянные трубки абсорбера в вакуум.

Повысить плотность солнечного излучения можно с помощью фокусирующих коллекторов, которые оборудуются оптическими устройствами типа линз, зеркал и др. (рисунок 9.2.3.19).



1 – остекление; 2 – лучепоглощающая поверхность с трубками для жидкости, которая нагревается (абсорбер); 3 – корпус; 4 – теплоизоляция; 5 – подача теплоносителя

а – трубка в листе; *б* – соединение плоского и гофрированного листов; *в* – штампованные листы; *г* – плоский лист с приваренными к нему прямоугольными каналами

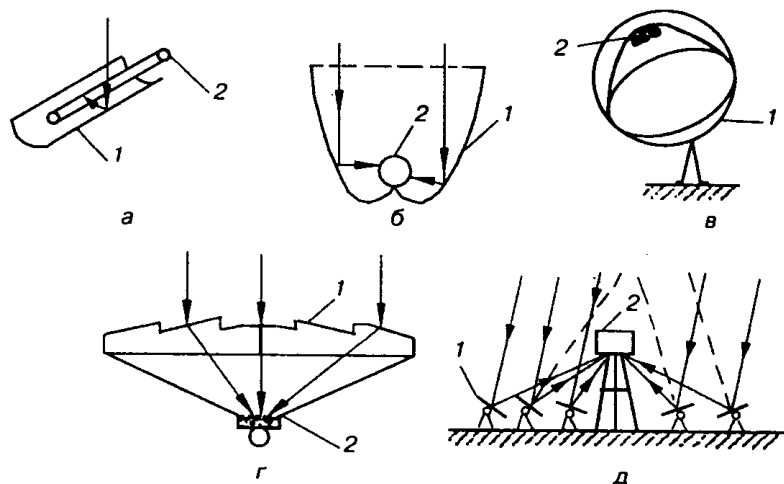
Источник: Соловей А.И.

Рисунок 9.2.3.18. Схема конструкции плоского коллектора солнечной энергии и конструктивные схемы абсорберов.

Особенностью фокусирующих коллекторов является необходимость отслеживания положения Солнца не с помощью специальных автоматических механизмов, так как они неприемлемы для рассеянного солнечного излучения.

В качестве теплоносителя в плоских коллекторах гелиоустановок, предназначенных для отопления и горячего водоснабжения, используется чаще всего вода или антифриз, реже – воздух. Вода имеет высокую теплоемкость, достаточную плотность, хорошо проводит теплоту, но она имеет коррозионные свойства к большинству конструкционных материалов, а также способность замерзания при минусовых температурах. Воздух как теплоноситель свободный от недостатков воды, однако, его теплофизические свойства значительно уступают воде. К тому же уровень шума

вентиляторов в воздушных системах превышает, как правило, уровень шума водяных насосов для жидких систем.



а – параболический концентратор с трубчатым приемником излучения; *б* – фоклин; *в* – параболический концентратор; *г* – линза Френеля; *д* – поле гелиостатов с центральным приемником излучения; 1 – отражатель; 2 – теплоприемник

Источник: Соловей А.И.

Рисунок 9.2.3.19. Схемы концентраторов солнечной энергии

В жидкостных коллекторах может использоваться незамерзающие 50 %-ные водные растворы этиленгликоля и пропилен гликоля (температура замерзания – минус 30-40 °С). Их недостатком является небольшой срок службы, который не превышает 5 лет, к тому же этиленгликоль токсичен.

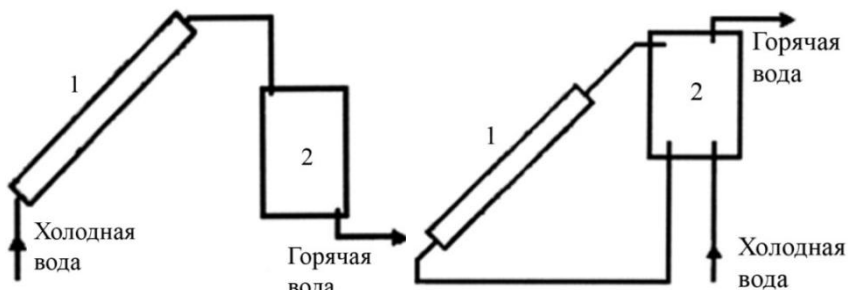
Для улучшения поглощения СИ абсорбер покрывают селективным слоем в виде сажи, оксида меди, черного никеля, черного хрома. Остекление, служит для снижения потерь энергии тепловым излучением от абсорбера в окружающую среду и защиты абсорбера от атмосферных осадков. Корпус коллектора

теплоизолируется пенопуретаном или полистиролом, могут использоваться и другие теплоизоляторы.

Система горячего водоснабжения

Простейшей установкой горячего водоснабжения является плоский бак, заполненный водой и закрытый стеклом. Летом в ясную погоду такая установка обеспечивает нагревание на 1 м² площади 50-100 л воды до температуры 40-50 °С. Такие системы имеют значительные потери вследствие тепломассообмена между водой и остеклением. Они используются в основном для горячего водоснабжения индивидуальных душевых, детских лагерей, кемпингов, пансионатов и т. п.

Основными элементами системы горячего водоснабжения является жидкостной солнечный коллектор и бак-аккумулятор (рисунок 9.2.3.20).



1 – солнечный водяной коллектор; 2 – бак-аккумулятор горячей воды

Рисунок 9.2.3.20. Принципиальная схема одноконтурной системы солнечного горячего водоснабжения с естественной циркуляцией теплоносителя и проточной

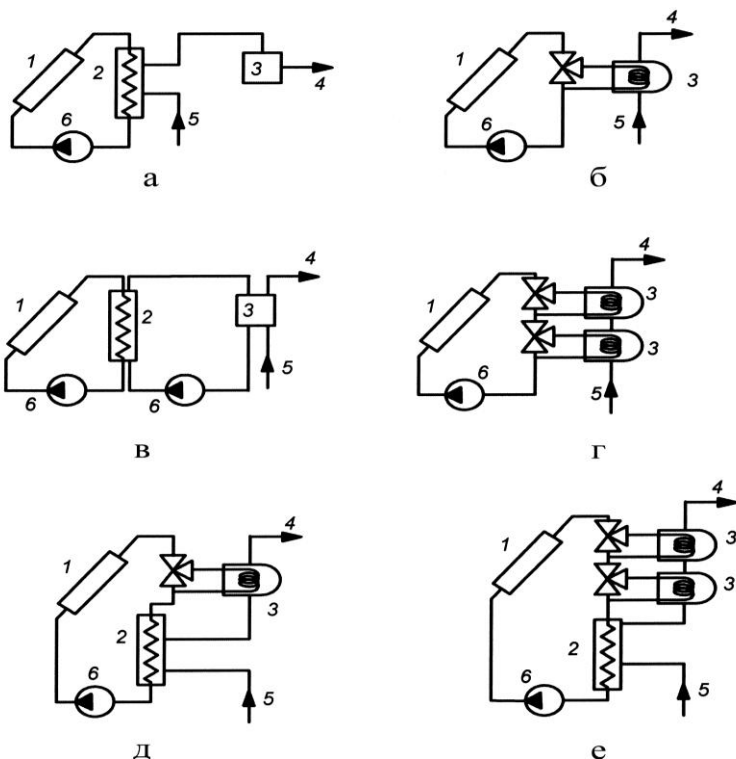
Системы могут быть одно-, двух- и многоконтурными, с естественной (термосифонной) или принудительной циркуляцией. Благодаря простоте изготовления и обслуживания одноконтурные и проточные системы имеют значительное распространение среди малых потребителей.

Для повышения эффективности работы коллекторов, возможности их работы в зимний период используют антифриз как промежуточный теплоноситель в двух- или многоконтурных системах с принудительной циркуляцией (рисунок 9.2.3.21). Такие системы используются для теплоснабжения домов отдыха, многоэтажных жилищных зданий, гостиниц и т. п.

Системы солнечного отопления

В системах солнечного отопления с помощью специального оборудования осуществляется регулируемое поглощение, аккумуляция и распределение солнечной теплоты. В этих системах теплота передается от солнечного коллектора к аккумулятору, а потом в помещения.

Системы солнечного отопления зданий, как правило, являются двухконтурными, но могут быть и многоконтурными.



а – со скоростным водо-водяным теплообменником; б – с баком-аккумулятором горячей воды, совмещенным с теплообменником; в – с промежуточным циркуляционным контуром; г – с секционными баками-аккумуляторами горячей воды, совмещенными с теплообменниками; д – со скоростными и емкостным водо-водяным теплообменником, совмещенным с баком-аккумулятором горячей воды; е – со скоростным и секционным емкостным водо-водяным теплообменником, совмещенным с секционными баками-аккумуляторами горячей воды;

1 – солнечный жидкостной коллектор; 2 – теплообменник; 3 – бак-аккумулятор горячей воды; 4 – горячая вода к потребителям; 5 – холодная вода; 6 – циркуляционный насос

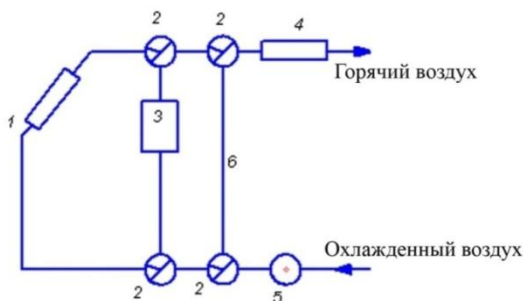
Источник: Соловей А.И.

Рисунок 9.2.3.21. Принципиальные схемы двухконтурных систем солнечного горячего водоснабжения с принудительной циркуляцией теплоносителя

Теплоносителем в этих системах могут быть как жидкости, так и воздух, в разных контурах могут использовать разные теплоносители (например, в солнечном коллекторе – водные растворы незамерзающих жидкостей, в промежуточных контурах – вода, а в контуре потребителя – воздух). Площадь поверхность коллектора для систем отопления обычно в 3-5 раз больше чем у системы горячего водоснабжения.

Необходимым элементом солнечной системы отопления является аккумулятор, в качестве которого в большинстве случаев используется галька, при этом теплоноситель - воздух (рисунок 9.2.3.23).

Системы с воздушным теплоносителем имеют ряд преимуществ по сравнению с водяными. К преимуществам относится отсутствие замерзания теплоносителя в солнечном коллекторе и перегрева в период, когда теплота не отводится, коррозия в таких системах также незначительна. Недостатки: значительные затраты на перемещение нагретого воздуха, относительно большие объемы аккумулятора.



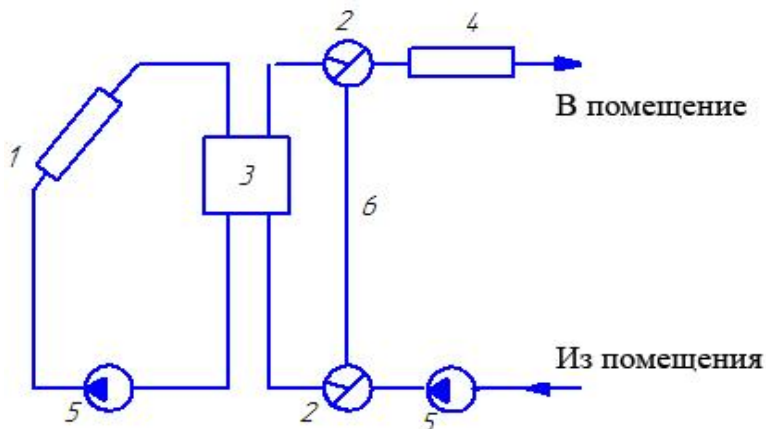
- 1 – солнечный воздушный коллектор; 2 – трехходовые задвижки;
3 – галечный аккумулятор теплоты; 4 – дополнительный источник энергии;
5 – вентилятор; 6 – байпасная линия аккумулятора

Источник: Соловей А.И.

Рисунок 9.2.3.22. Принципиальная схема активной воздушной системы солнечного отопления

На рисунке 9.2.3.23 представлена принципиальная схема наиболее распространенной системы водяного отопления с баком-аккумулятором.

К преимуществам системы водяного отопления относится использование общего теплоносителя для системы тепlopередачи и аккумулятора, меньший объем аккумулятора и относительно низкие энергетические затраты на перекачивание энергоносителя. Однако использование воды в системах отопления создает ряд трудностей, которые связаны с возможностью замерзания воды в солнечном коллекторе в ночные часы, возникновение коррозии в системе.



1 – солнечный водяной коллектор; 2 – трехходовой кран; 3 – водяной аккумулятор тепла; 4 – дополнительный источник тепла; 5 – насос; 6 – байпасная линия аккумулятора

Источник: Соловей А.И.

Рисунок 9.2.3.23. Принципиальная схема водяной системы солнечного отопления

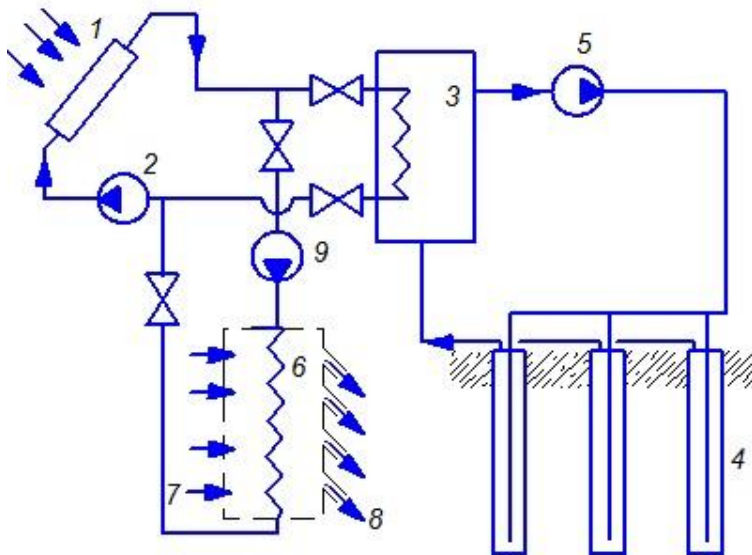
Для предотвращения замерзания теплоносителя используют раствор антифриза, но для этого целесообразно иметь двухконтурную систему. В солнечном контуре используется антифриз, а в системе отопления – вода, оба контура разделяют

теплообменником, что является более целесообразным, чем использование одноконтурной системы с антифризом.

Интерес представляет схема использования солнечной энергии для отопления, которая используется в офисах. Жидкий теплоноситель коллектора через бак-аккумулятор обеспечивает накопление теплоты солнечного коллектора в аккумуляторе большой емкости, который расположен в подвальной части здания (под фундаментом). В холодное время года в специальном теплообменнике аккумулированная теплота используется для подогрева приточного воздуха (рисунок 9.2.3.24).

Все рассмотренные выше системы относятся к активным, т.к. используют дополнительные устройства для поглощения, преобразования и распределения солнечной энергии. Пассивное использование энергии Солнца с целью отопления зданий осуществляется за счет архитектурно-проектных и конструктивных решений.

Пассивные системы теплоснабжения являются более простыми и дешевыми по сравнению с активными системами, потому что не требуют дополнительных устройств.



1 – солнечный коллектор; 2 – коллекторный насос; 3 – бак-аккумулятор;
 4 – сезонный аккумулятор теплоты; 5 – насос сезонного аккумулятора;
 6 – теплообменник подогрева приточного воздуха; 7 – приток холодного воздуха; 8 – подача подогретого воздуха в помещение;
 9 – насос системы вентиляции

Источник: Соловей А.И.

Рисунок 9.2.3.24. Система использования солнечной энергии для отопления с накоплением теплоты в сезонном аккумуляторе

Разные методы проектирования и строительства зданий, оборудованных пассивными системами, могут быть разделены на пять основных системных типов: прямое накопление; стена-теплонакопитель; домашний солнечный; крыша-теплонакопитель; конвекционная система восходящих потоков. Каждая из этих систем представлена совокупностью компонентов, каждый из которых выполняет отдельную функцию, необходимую для эффективной работы в целом.

Все пассивные системы включают пять основных компонентов: коллектор, абсорбер, накопитель, распределитель и регулятор.

Коллектор состоит из прозрачного или полупрозрачного стекла, вставленного в раму на внешней стороне здания. Коллектор может быть установлен вертикально, как в окнах, так и под углом (на крыше).

Абсорбер – это твердый материал, поверхность которого окрашена в темный цвет и подвергается влиянию солнечного света, который проникает через коллектор. Абсорбер преобразует солнечное излучение в теплоту, которая выделяется в помещении или накапливается.

Накопитель – это материал, который может удерживать теплоту на протяжении суток или более продолжительного времени. Масса материала прямо пропорциональна его теплоемкости, и потому такой строительный материал для жилых зданий, как кирпич, является хорошим накопителем. Накопители достаточно медленно отдают теплоту, что позволяет поддерживать постоянную температуру в жилых помещениях. В некоторых случаях материалы-накопители могут быть использованы для охлаждения, поглощая избыток теплоты с жилого помещения и тем самым охлаждая его. Размеры накопителей определяют исходя из их свойств и количества теплоты, которое приходит через коллектор, размещенный в комнатах (или примыкает к ним) для их обогрева или охлаждения. Часто функции накопителя и абсорбера объединяются одним элементом, например кирпичный пол или стена.

Распределитель служит для передачи накопленной теплоты в конкретные помещения. Распределение может осуществляться естественным путем с помощью конвекции воздуха в помещении или за счет теплового излучения от стен. Роль распределителя могут

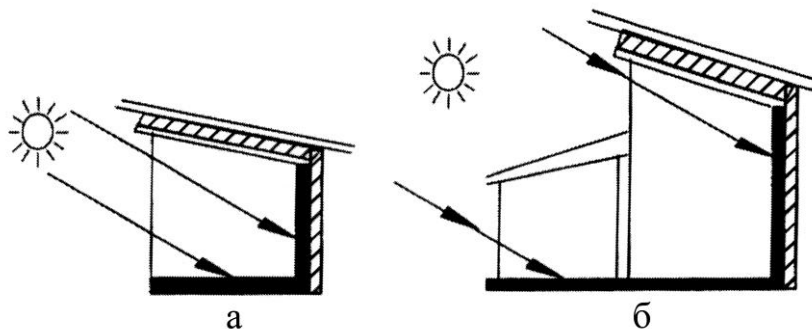
выполнять насосы и вентиляторы, перемещающие теплый или охлажденный воздух.

Регулирование предназначено для дозирования теплораспределения или накопления теплоты в пассивной форме. Существуют три типа регулирующих компонентов:

- шторы приспособления, которые уменьшают поступление солнечного света через стекло-коллектор;
- рефлекторы, которые увеличивают поступление солнечного излучения через коллектор;
- сменные теплоизолирующие устройства, которые уменьшают поступление теплоты через коллектор в помещения.

В качестве примера приведем простейшую систему прямого накопления - систему нагревательного типа, которая используется в большинстве случаев во влажных и умеренных климатических районах.

В отопительный сезон на протяжении светового дня солнечный свет проходит в здание через окна южной стороны, стеклянные двери, верхние окна, другими словами через все коллекторы. Солнечное излучение аккумулируется и сохраняется элементами интерьера. В домах прямого накопления элементами накопителя и абсорбера являются, прежде всего, полы и стены (рисунок 9.2.3.25), хотя и потолки и другие элементы, например мебель, также могут быть спроектированы таким образом, чтобы накапливать теплоту в помещении.



а – основная система; б – окно в фанаре для прямого нагревания задней стены

Источник: Соловей А.И.

Рисунок 9.2.3.25. Прямое накопление солнечного излучения

Другие пути использования тепловой энергии Солнца

Солнечный пруд

Техническое решение «солнечный пруд», который представляет собой гелиоприемник, соединенный с теплоаккумулятором энергии Солнца в виде неглубокого (2-3 м) водоема, предложил в 1902 г. А. фон Калечицкий, который определил, что на дне небольшого соленого озера Мадве в Трансильвании вода нагревается до 70 °С. Оказалось, что лишь относительно небольшие соленые озера имеют эту уникальную способность – накапливать теплоту солнечного излучения. На отличие от пресной, соленая вода, когда нагревается в естественном слое, не “всплывает”, а в процессе повышения температуры дополнительно растворяет соль на дне озера и таким способом увеличивает свою плотность. Естественная конвекция, которая выравнивает перепады температур, а следовательно и плотность в пресных озерах, в соленых блокируется, поэтому естественный слой может нагреваться солнечным излучением вплоть до температуры кипения рассола.

Первый искусственный солнечный пруд был создан в Израиле в г. Ейн Бореке на берегу Мертвого моря. Этот пруд площадью 1500 м² был испытан в составе экспериментальной фреоновой энергоустановки мощностью 6 кВт в 1979 г.

К преимуществу солнечных прудов можно отнести минимальные тепловые расходы и низкий уровень капитальных вложений на 1 кВт установленной мощности.

Солнечные пруды можно использовать как элемент системы солнечного горячего водоснабжения объектов сезонного действия или, при использовании теплонасосных установок - круглогодичного.

Солнечные энергетические печи

Синтез новых тугоплавких оксидных материалов, лучевая термообработка материалов с целью улучшения их эксплуатационных свойств, определение теплофизических, спектрально-оптических характеристик, получение сверхчистых материалов, испытания на лучевую стойкость узлов новой техники и т. п. осуществляется при высоких температурах. Для решения этих задач наряду с лазерными установками и печами с искусственными источниками широко используются концентраторы солнечной энергии, при этом иногда их использование является единственным способом, который обеспечивает решение многих приведенных выше задач, когда требуются мощные световые потоки разного спектрального состава. В таких случаях наиболее пригодными могут быть крупногабаритные концентраторы солнечной энергии, аналогичные Большой солнечной печи мощностью 1000 кВт. Это сложный оптико-механический комплекс с автоматическими системами управления; в состав комплекса входит гелиостатическое поле и параболоидный концентратор, в результате в фокальной зоне

концентратора (технологическая башня) формируется лучевой стационарный поток высокой плотности.

Печь расположена в 45 км от г. Ташкента в предгорьях Тянь-Шаня на высоте над уровнем моря 1050 м. Гелиостатическое поле образуется 62 гелиостатами, расположенными в шахматном порядке на пологом склоне горы; режим автоматического слежения за Солнцем на протяжении рабочего дня обеспечивает светимость всей зеркальной поверхности концентратора, расположенного на высоте 42,5 м. Общая площадь поверхности гелиостатов, которые отражают солнечные лучи, составляет 3022,5 м².

Солнечный обогрев бассейнов

В США и Европе солнечные обогреватели для бассейнов используются практически всюду, только в США больше 200 тыс. бассейнов обогреваются солнечной энергией. Обогревание открытого бассейна позволяет на несколько недель продлить купальный сезон без дополнительных расходов, срок окупаемости системы составляет 2-4 года.

Коллекторы, как правило, устанавливаются на крыше помещения, хотя для этого подходит любое место, куда большую часть суток попадают солнечные лучи при выполнении основных проектных норм. Это место должно быть горизонтальным или с небольшим наклоном (не более 30°).

Солнечное охлаждение

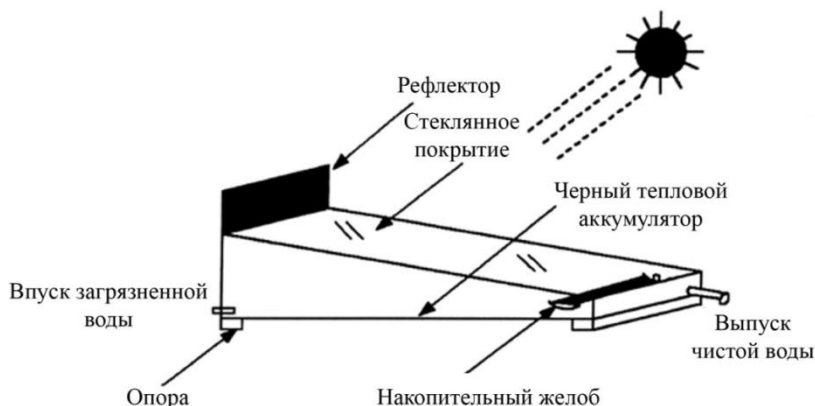
Существуют три основных метода активного охлаждения. Во-первых, использование электрических компрессоров, которые в развитых странах представляют собой сегодня стандартное охлаждающее устройство. Во-вторых, использование абсорбционных кондиционеров, которые приводятся в действие с помощью тепловой энергии. Оба вида используются для кондиционирования воздуха, то есть охлаждение воды до 5 °С и замораживания ниже 0 °С.

Существует и третья возможность для кондиционирования воздуха – охлаждение с использованием испарения. Все системы могут работать на солнечной энергии, их дополнительное преимущество – использование абсолютно безопасных рабочих веществ: простой воды, солевого раствора или аммиака. Существует возможность использования такой технологии не только для кондиционирования воздуха, но и для охлаждения для сохранения продуктов и т. п.

Из приведенных видов наиболее перспективным являются абсорбционные охладители, которые используют теплоту солнечных коллекторов, так как они экологически безопасные.

Солнечные дистилляторы

Во всем мире много людей ощущает недостаток чистой воды. С 2,4 млрд. жителей стран, которые развиваются, только около 500 млн. имеют доступ к чистой питьевой воде, не говоря уже о дистиллированной воде. Решению этой проблемы может содействовать солнечная дистилляция (рисунок 9.2.3.26).



Источник: Соловей А.И.

Рисунок 9.2.3.26. Схема солнечного дистиллятора

В основе работы прибора положен принцип испарения воды из открытого контейнера, энергия Солнца используется для ускорения

этого процесса. В среднем солнечный дистиллятор может вырабатывать 1 л дистиллированной воды за сутки с 1 м²дистиллятора. Обследования дистиллированной воды показали, что из нее удалены все вредные бактерии, а количество пестицидов и удобрений снижается на 75-99,5 %.

В качестве дополнительных способов использования энергии солнца можно назвать солнечные бытовые печи или плиты, которые дешевы и просты в изготовлении, а также солнечную сушку урожая, что является одним из древнейших прямых методов использования солнечной энергии.

9.2.3.4. Социально-экологические аспекты использования солнечной энергетики.

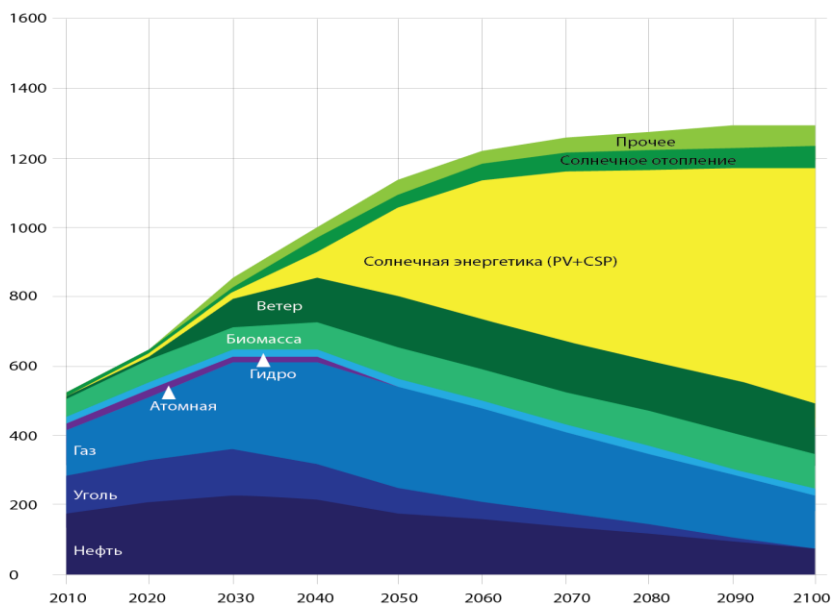
Солнечная энергетика обладает рядом достоинств, среди которых перспективность, доступность и неисчерпаемость источника энергии в условиях постоянного роста цен на традиционные виды энергоносителей. Главный экологический эффект солнечной энергетики состоит в том, что собранная гелиоэнергетическими установками солнечная радиация заменяет энергию, которая произведена с помощью традиционных, по большей части достаточно грязных для окружающей среды технологий.

С учетом перспектив роста объемов выработки солнечной энергии (рисунок 9.2.3.27) экологический аспект будет иметь все больший вес и его следует рассмотреть более подробно.

Солнечная энергетика в целом является одним из наиболее чистых в экологическом отношении способов получения энергии. И хотя существует теоретическая вероятность того, что её повсеместное внедрение может изменить альбедо (характеристику отражательной (рассеивающей) способности) земной поверхности и привести к изменению климата, при современном уровне

потребления энергии это крайне маловероятно. С другой стороны, если учитывать всю технологическую цепочку от получения требующихся материалов до производства электроэнергии, полностью избежать вредного воздействия солнечной энергетики на человека и окружающую среду не удастся.

Основное вредное влияние гелиоустановок на окружающую среду не прямое – это технологические процессы, которые связаны с производством новых соединений для оборудования гелиоустановок. В большинстве случаев это оборудование требует редкоземельных элементов, которые содержатся в очень малых концентрациях в земных породах и для их добычи требуется переработка значительного количества этих пород.



Источник: German Advisory Council

Рисунок 9.2.3.27. Потребление энергии в Эксаджоулях. (1 ЭДж = 278 млрд кВт*ч, 100 ЭДж = Годовое потребление США)

В частности, эксплуатация, например, СФЭУ наносит минимальный вред окружающей среде. Производство же полупроводниковых материалов является весьма экологически и социально опасным. Поэтому в развитых странах (например, в США) существуют жесткие требования к производству, хранению, транспортировке и ликвидации вредных веществ процесса производства этих элементов, ограничения контактов персонала с ними, разработка планов действия в случае аварийных или нештатных технологических ситуаций и т.д.

Экологическое воздействие солнечных концентраторов, как указывалось выше, в основном связано с большим по площади затенением земель, что приводит к сильным изменениям почвенных условий, растительности и т. д. Кроме того при прохождении через воздух сконцентрированного солнечного излучения, возникает его нагрев, что может приводить к изменению теплового баланса, влажности, направления ветров. Химический состав жидкостей, применяемых в качестве теплоносителя также должен подвергаться строгому контролю, поскольку их утечка может спровоцировать загрязнение почвы и грунтовых вод. Особую опасность представляют жидкости, содержащие хроматы и нитриты, являющиеся высокотоксичными веществами.

Что касается теплового режима планеты, гелиоустановки на него не влияют, так как используют очень малую часть солнечной теплоты, но и она после преобразования в электрическую энергию и ее использования возвращается в окружающую среду в виде теплоты.

Энергия, которая затрачена на производство солнечного коллектора, равняется энергии, какую коллектор вырабатывает на протяжении 1-4 лет.

Для полноценного развития научного потенциала и отрасли солнечной энергетики помимо природных условий нужна сильная

государственная поддержка, которая в России почти полностью отсутствует. Комплексное развитие инновационного сектора возобновляемой энергетики и введение в эксплуатацию мощностей солнечной генерации в нашей стране в основном сдерживает отсутствие нормативно-правовой базы.

Существует ряд подзаконных актов, касающихся развития отрасли, а также постановление правительства № 426 «О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии», кроме того, есть распоряжение правительства (от января 2009 года) об утверждении целевых показателей по увеличению к 2015 и 2020 годам доли ВИЭ в общем уровне российского энергобаланса до 2,5% и 4,5% соответственно. Однако все эти документы так и остаются на уровне деклараций и на самом деле не работают. В России на данный момент нет ни одного объекта ВИЭ, который бы получил господдержку в области солнечной энергетики.

Фактически уже сейчас цели, указанные в распоряжении правительства, не выполняются. В том же распоряжении было указано, что к 2010 году доля ВИЭ должна составить 1%, но даже в 2011 году мы не достигли таких показателей. Кроме того, не существует четкого представления, как достигнуть 2,5% к 2015 году.

Для достижения утвержденных правительством целевых показателей нужен прежде всего четкий механизм стимулирования возобновляемой энергетики, и в частности солнечной энергетики. Например, введение специальных тарифов и специальных условий для участия объектов генерации на основе ВИЭ на оптовом рынке электроэнергии (мощности), введение действующего инвестиционно-налогового кредита (который, например, в Америке для солнечных электростанций составляет 30% – любой девелопер солнечной станции получает 30% обратно в виде налогового вычета или

единовременного гранта, то есть государство возвращает часть вложенных средств в проект), федеральная программа, которая будет запускать пилотные проекты за счет государственных средств. Существует широкий набор действенных мер государственной поддержки, результаты введения которых привели к существенному макроэкономическому эффекту в зарубежных странах.

На сегодняшний день компании, консультанты и другие игроки рынка объединяются для защиты своих интересов и эффективного развития отрасли. Подобные объединения могут помочь государству разработать грамотные и эффективные меры поддержки отрасли. Очень важно, чтобы господдержка была выработана в ходе поиска компромиссного решения, то есть такая поддержка, которая бы соответствовала поставленным целям, позволила бы государству достичь этих 4,5% и 2,5% к 2015 году и при этом не «перегрела» бы рынок и соответствовала ожиданиям инвесторов. Для этого и нужны бизнес-сообщества и некоммерческие сообщества, которые могут предоставить актуальную информацию, привлечь международный опыт и аргументировать позицию.

9.2.4 Практические вопросы и решения

1. Понятие кадастра солнечной энергии.
2. Понятие валового потенциала солнечного излучения в точке А и территории S (m^2 или km^2).
3. Расчет технико-экологического потенциала солнечного излучения.
4. Расчет потенциала использования солнечной энергии вместе с заданными климатическими условиями.
5. Дать классификацию солнечных энергетических установок по виду преобразования и использования солнечного излучения.

6. Пояснить достоинства и недостатки солнечных энергетических установок различных типов.

7. Назовите и поясните особенности основных схем использования солнечной энергии.

8. Поясните физические основы принципов преобразования солнечного излучения в другие виды энергии в различных типах солнечных энергетических установок.

9. Нарисуйте принципиальную схему фотоэлемента и поясните ее энергетические особенности.

10. Поясните какие факторы влияют на эффективность солнечного элемента.

11. Нарисуйте электрическую схему замещения фотоэлемента.

12. Нарисуйте вольт-амперные характеристики солнечных элементов и поясните их особенности.

13. Расчет и выбор компонентов фотоэлектрической установки.

14. Поясните экологические аспекты, обусловленные строительством и долгосрочным использованием солнечных энергетических установок.

15. Как можно повысить эффективность застроенной окружающей среды за счет использования солнечной энергии?

16. По материалам свободных источников поясните основные тенденции изменения экономических показателей солнечной энергетики во времени и дайте их прогноз на ближайшие 10 лет.

Студент может также найти вопросы самоконтроля по и задачи, которые можно решить по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU.

9.2.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)

1. Stefan C.W. Krauter, Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems: Modeling of Optical and Thermal Performance, Electrical Yield, Energy Balance, Effect on Reduction of Greenhouse Gas Emissions: ISBN-10: 3540313451, Edition: 2006
2. Solar Energy, Edited by Radu D Rugescu, ISBN 978-953-307-052-0, 432 pages, Publisher: InTech, Chapters published February 01, 2010 under CC BY-NC-SA 3.0 license
3. Solar Cells - New Aspects and Solutions, Edited by Leonid A. Kosyachenko, ISBN 978-953-307-761-1, 512 pages, Publisher: InTech, Chapters published November 02, 2011 under CC BY 3.0 license
4. Michael Boxwell Solar Electricity Handbook, Publisher: Greenstream Publishing; 2012 Edition edition
5. Bradford, Travis (2006). Solar Revolution: The Economic Transformation of the Global Energy Industry. MIT Press. ISBN 0-262-02604-X.
6. Labouret, Anne. Solar Photovoltaic Energy, 2010
7. White, Liam G. Solar Energy Technologies : From Research to Deployment, 2010
8. Tiwari, G. N. Solar Energy : Fundamentals, Design, Modelling and Applications, 2006
9. Balcomb, J. Douglas (1992). Passive Solar Buildings. Massachusetts Institute of Technology. ISBN 0-262-02341-5.
10. Scheer, Hermann (2002). The Solar Economy (Renewable Energy for a Sustainable Global Future). Earthscan Publications Ltd. ISBN 1-84407-075-1
11. Mark Hankins, Stand-alone Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation, Earthscan, 2010

12. Photovoltaic systems, American Technical Publishers, Inc., 2007
13. John R. Balfour, Michael Shaw, Advanced Photovoltaic System Design, Jones & Bartlett Publishers, 2011
14. Richard J. Komp, Practical photovoltaics: electricity from solar cells, Aatec Publications, 1995
15. Jenny Nelson, The Physics of Solar Cells, Imperial College Press, 2003
16. Martin A. Green, Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion, Springer, 2003
17. D. Yogi Goswami, Frank Kreith, Jan F. Kreider, Principles of Solar Engineering, Second Edition, CRC Press, 2000
18. Solar Photovoltaic Power Generation Using PV Technology: The economics of PV systems, IT Power (Organization), Asian Development Bank, 1996
19. Keiichi Komoto, Energy from the Desert: Very Large Scale Photovoltaic Systems : Socio-economic, Financial, Technical and Environmental Aspects, Earthscan, 2009
20. Photovoltaics: Design and Installation Manual, Solar Energy International, New Society Publishers, 2013
21. Андреев В.М. и др. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения, Л.: Наука, 1989. – 310 с.
22. Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии (курс лекций, формат pdf, размер 1,58 Мб)
23. Магомедов А.М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. – Махачкала: Юпитер, 1996. – 245 с.
24. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.; под ред. В.И. Виссарионова. -М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 276 с.

25. Елистратов В.В. Возобновляемые источники энергии. Изд.2-е доп.- СПб.: Наука, 2013.- 308 с.

26. В.Г. Лабейш. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб.пособие. - СПб.: СЗТУ, 2003.-79 с.

27. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие. / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.

9.3 Тема лекции 3: Технологии использования ветровой энергии

БЕЛЕЙ В.Ф., ЗАДОРЖНЫЙ А.О.

9.3.1 Введение в лекцию

Тема знакомит с технологией использования энергии ветра. Анализируются основные вопросы, связанные с применением ветроэнергетических установок: физические процессы, потенциал использования энергии ветра, типы ветроэнергетических установок, подключение ветроэнергетических установок к энергосистеме, экологические аспекты, экономическая составляющая.

9.3.2 Цель и основные результаты обучения

Целью обучения по этой теме является изучение технологий использования ветровой энергии. Результатом обучения является получение сведений: о потенциалах ветровой энергии; технологиях использования ветровой энергии; экологичности технологий использования ветровой энергии для процесса существования застроенной окружающей среды.

Предполагаемые основные результаты обучения соответствуют предусмотренным целям.

9.3.3 Конспект лекции и раздаточные материалы

Все материалы, видео, калькуляторы и программное обеспечение лучших университетов мира с открытым кодом вы можете найти по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU. Материал лекции включает в себя следующие разделы:

1. Базовые знания о ветре и его энергетическом потенциале.
2. Типы и характеристики ветроэнергетических установок.
3. Методика расчета годовой выработки электрической энергии ветроэнергетической установкой и оценка ее окупаемости.
4. Подключение и работа ветроэнергетических установок в составе электроэнергетических систем.
5. Оценка экологичности технологий использования ветряной энергии для процесса существования застроенной окружающей среды.

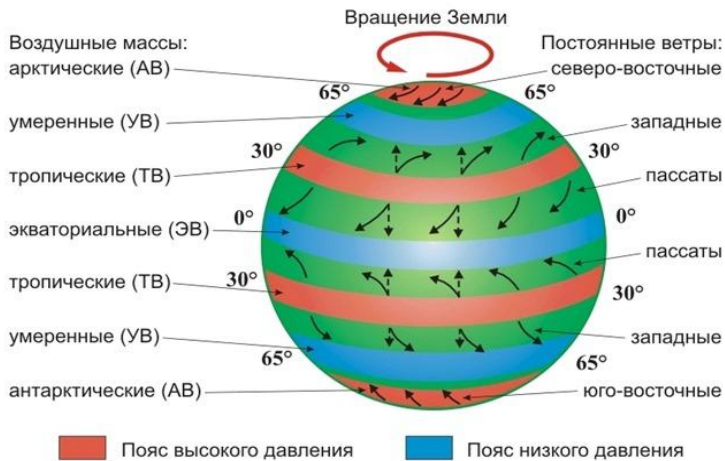
Каждый раздел состоит из различных материалов, видео, калькуляторов и программного обеспечения с открытым кодом.

9.3.3.1 Базовые сведения о ветре и его энергетическом потенциале

Ветровая энергия представляет собой кинетическую энергию воздушных масс, перемещающихся в атмосфере Земли, в которую преобразуется часть энергии, поступающей на Землю от Солнца. Атмосферой принято считать ту область вокруг Земли, в которой газовая среда вращается вместе с Землей как единое целое, что составляет около 700 км. По мнению же специалистов авиа и космических организаций граница атмосферы и космоса проходит на высоте 112 км от поверхности земли.

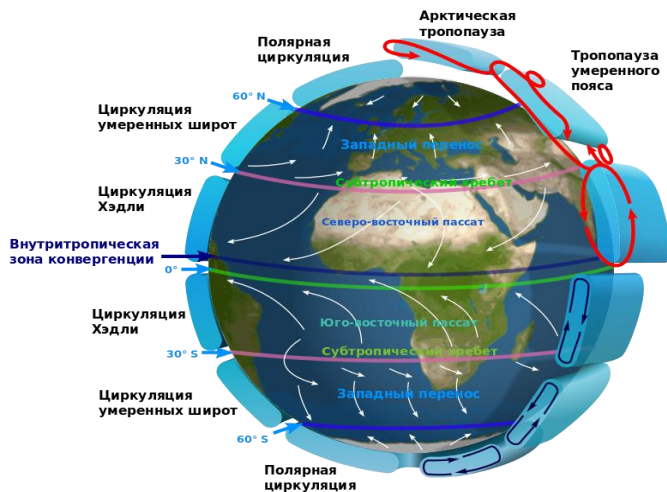
Так как наша планета имеет шарообразную форму, то интенсивность солнечного излучения снижается от экватора к полюсам, что определяет различный нагрев поверхности земли,

неравномерность давления воздуха в атмосфере (рисунок 9.3.3.1), и в итоге приводит к перемещению воздушных масс в атмосфере в виде ветра (рисунок 9.3.3.2).



Источник: <http://geolvg.blogspot.ru/2011/05/blog-post.html>

Рисунок 9.3.3.1. Зоны высокого и низкого давления Земли и направления ветров



Источник: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ветроэнергетика>

Рисунок 9.3.3.2. Распределение ветровых потоков в атмосфере при глобальной циркуляции

Таким образом, осуществляется преобразование энергии, поступающей от Солнца, через тепловую в кинетическую. Перенос воздушных масс в атмосфере носит как глобальный (рисунок 9.3.3.1 и 9.3.3.2), так и локальный характер.

Основные глобальные циркуляции воздушных масс в атмосфере.

Экваториальная циркуляция. На высоте от 1 до 4 км от поверхности земли, в зоне между 30° северной и южной широт, имеют место равномерные воздушные течения (пассаты). В северном полушарии ближе к поверхности земли их средняя скорость составляет 7-9 м/с.

Циркуляции в северном и южном полушариях. Они образуются между 30 и 70 градусами северной и южной широты, что обуславливает направление к полюсам теплого, а к субтропикам холодного воздуха.

Вокруг зоны пониженного давления образуются крупномасштабные циркуляции воздушных масс – в северном полушарии против направления движения часовой стрелки, а в южном – по направлению ее движения. Вследствие наклона 23,5° оси движения Земли к плоскости ее вращения относительно Солнца происходят сезонные изменения тепловой энергии, получаемой от него, величина которых зависит от силы и направления ветра над определенной зоной земной поверхности (рисунок 9.3.3.1).

На относительно большой высоте над поверхностью земли (в среднем 8-12 км) возникают мощные и достаточно равномерные воздушные течения, получившие название струйных. Их образование вызвано особенностями высотной атмосферной циркуляции. Размеры струйных течений в поперечнике достигают 400-600 км, в ширину 2-4 км, а в протяженность до 1000 км. Обычно они не подвержены большим сезонным изменениям, но могут менять свое

расположение по высоте. Скорости воздушных масс в ядре струйного течения составляют 8,3-22,2 м/сек, но часто доходит до 55,6 м/сек.

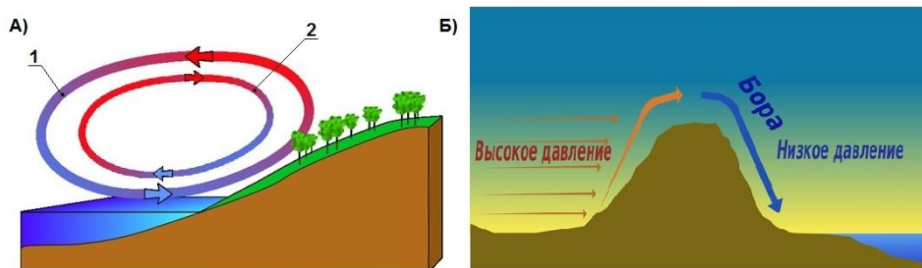
Из-за глобального распределения энергии в атмосфере возникают циркуляции: муссоны и тропические тайфуны. Муссоны – масштабные переносы воздушных масс вследствие температурного разграничения между Атлантическим океаном и Африкой, азиатским континентом и Индийским океаном.

Как было отмечено выше, перенос воздушных масс имеет также и локальный характер, который обладает региональной спецификой.

Поскольку поверхность Земли неоднородная, то даже на одной и той же широте суша, водные пространства, горы, лесные массивы и пустыни нагреваются по-разному. В течение дня над морями и океанами воздух остается сравнительно холодным, поскольку значительная часть энергии солнечного излучения расходуется на испарение воды или поглощается ею. Над сушей воздух прогревается сильнее, расширяется, снижает свою массовую плотность и устремляется в более высокие слои над землей. Его замещают более холодные, плотные воздушные массы, располагавшиеся над водными пространствами. Эти местные ветры, образующиеся в прибрежных зонах, носят название бризов и меняют свое направление два раза в сутки (рисунок 9.3.3.3).

Аналогичные процессы происходят в гористых местах и долинах вследствие разных уровней нагрева экваториальных зон и полюсов Земли и многих других факторов. Например, горно-долинные ветры в горах и ледниковые ветры, постоянно дующие вниз по склонам ледяных долин. К локальным ветрам также относятся ветры, связанные с общей циркуляцией атмосферы над горными массивами. При этом на подветренных склонах гор воздух получает нисходящую составляющую скорости и усиливается,

создавая локальные ветры, получившие названия боры, фена и другие (рисунок 9.3.3.3).



Источник: <https://en.wikipedia.org/?title=Wind>, [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бора_\(ветер\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бора_(ветер))

Рисунок 9.3.3.3. А) Циркуляция воздуха и направление ветра в течение суток: 1 - дневной бриз; 2 - ночной бриз; Б) Схема возникновения боры.

Характер циркуляции земной атмосферы усложняется вследствие сил инерции, таких как сила Кориолиса и центробежная сила, возникающих при вращении Земли. Они вызывают различные отклонения воздушных течений, образуется множество циркуляций второго порядка, взаимодействующих между собой.

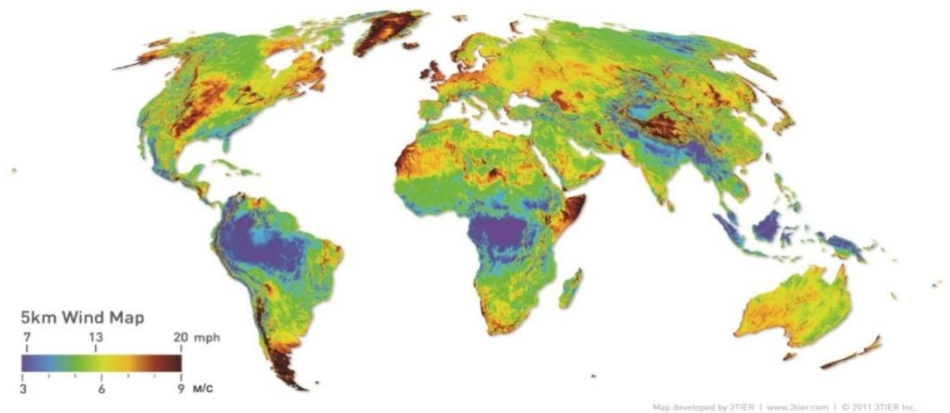
Важнейшими характеристиками, определяющими энергетическую ценность ветра является скорость $v(t)$ (м/сек) и удельная мощность воздушного потока Руд (Вт/м²).

Основная характеристика ветра, определяющая его интенсивность и эффективность использования ветровой энергии это средняя скорость ветра v_{cp} , рассчитываемая как отношение суммы измеренных через равные интервалы времени значений мгновенной горизонтальной составляющей скорости ветра v_i к числу измерений n за выбранный промежуток времени.

$$v_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}, \quad (9.3.3.1)$$

где $i = 1, 2 \dots n$ – порядковый номер измерения.

На рисунке 9.3.3.4 приведена карта средних значений скорости ветра в мире на высоте 80 метров над уровнем земли.



Источник: <http://www.vaisala.com/en/energy/support/Resources/Pages/Free-Wind-And-Solar-Resource-Maps.aspx>

Рисунок 9.3.3.4. Карта средних скоростей ветра в мире на высоте 80 метров

Приведем вывод выражения для определения удельной мощности воздушного потока. Объем воздуха, проходящий со средней скоростью через поперечное сечение площадью F (*ометаемая поверхность ветроколеса*) ($F = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$), обладает кинетической энергией $W_{\text{ВП}}$ (Дж) (рисунок 9.3.3.5).

$$W_{\text{ВП}} = m \cdot \frac{v^2}{2} \quad (9.3.3.2)$$

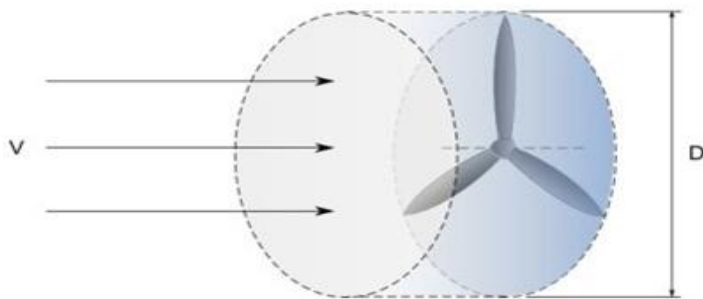


Рисунок 9.3.3.5. Поток ветровой энергии через ометаемую поверхность ветроколеса

Масса воздуха, протекающая через рассматриваемое сечение со скоростью v в единицу времени (кг/сек) определяется по выражению:

$$m = \rho \cdot F \cdot v, \quad (9.3.3.3)$$

где ρ – плотность воздуха.

Отсюда мощность воздушного потока $P_{ВП}$ (Вт) определяется по выражению:

$$P_{ВП} = 0,5 \cdot \rho \cdot F \cdot v^3 \quad (9.3.3.4)$$

Удельная мощность воздушного потока $P_{уд}$ (Вт/м²) равна энергии, переносимой ветровым потоком в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной вектору скорости ветра, определяется по выражению:

$$P_{ВП}^{уд}(v(t)) = 0,5 \cdot \rho \cdot v(t)^3, \quad (9.3.3.5)$$

Тогда удельная энергия воздушного потока (Вт · ч/м²) за период времени (T) составит:

$$W_{ВП}^{уд}(T) = 0,5 \cdot \rho \cdot \int_0^T v(t)^3 \cdot dt \quad (9.3.3.6)$$

Как известно, плотность воздуха в определенной степени зависит от температуры и атмосферного давления, что следует учитывать в инженерных расчетах кинетической энергии, которой обладает ветровой поток.

Энергетическими характеристиками ветровой энергии являются его валовый, технический и экономический ресурсы (потенциалы).

Валовый (теоретический) потенциал ветровой энергии региона — это часть среднесуточной суммарной ветровой энергии, которая доступна для использования на площади региона в течение одного года. При определении валового потенциала региона исходят из предположения, что географические, климатические и погодные условия являются однородными по всей площади рассматриваемого региона. Рассмотрим вывод выражения для расчета валового потенциала региона, так как это является важным для определения основных энергетических характеристик ветровой энергии. Валовый потенциал принято определять на основании факта, что обтекание воздушными потоками препятствия высотой (H), возмущенный воздушный поток полностью восстанавливается на расстоянии равном $20H$ после препятствия. То есть, расстояние между ВЭУ должны быть не менее $20H$, где H – высота на уровне ступицы ветроколеса ВЭУ. Тогда модель для определения валового потенциала ветровой энергии представляет систему «воздушных плотин» высотой H , ориентированных перпендикулярно направлению ветра и расположенных на плоской поверхности Земли с расстоянием $20H$ друг от друга (рисунок 9.3.3.6).

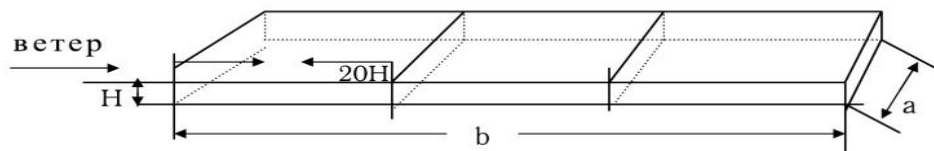


Рисунок 9.3.3.6. Модель для определения валового потенциала ветровой энергии

Общая площадь ($S_{\text{расч}}$), пересекаемая воздушными потоками с учетом площади рамок ($a \cdot H$) и количество рамок ($n_p = b/20H$), определится по формуле (9.3.3.7)

$$S_{\text{расч}} = a \cdot H \cdot n_p = \frac{a \cdot H \cdot b}{20 \cdot H} = \frac{S}{20} \quad (9.3.3.7)$$

Очевидно, что формула (9.3.3.7) не изменится, если стороны (a) и (b) поменять местами по отношению к скорости ветра. Как следует из формулы (9.3.3.7), валовой потенциал в явном виде не зависит от высоты слоя H . Эта зависимость проявляется через скорость ветра, которая принимается при расчете ветропотенциала на уровне ступицы ветроколеса ВЭУ. Тогда удельный валовый потенциал ветровой энергии ($\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \cdot \text{сек}$ или $\text{Вт} \cdot \text{час} / \text{м}^2 \cdot \text{год}$) на территории площадью S , при условии, что все ВЭУ размещены друг за другом на расстоянии $20H$, определится по выражению:

$$W_{\text{ВП}(S)}^{\text{уд}}(T) = W_{\text{ВП}}^{\text{уд}}(T) \cdot \frac{S}{20} \quad (9.3.3.8)$$

Валовой потенциал ($\text{Вт} \cdot \text{час} / \text{год}$) региона (территории) определяется по формуле:

$$W_{\text{ВП}(S)} = W_{\text{ВП}}^{\text{уд}} \cdot S, \quad (9.3.3.9)$$

где $S, \text{м}^2$ — площадь зоны земной поверхности.

Технический потенциал ветровой энергии – это суммарная электрическая энергия, которая может быть получена от использования валового потенциала ветровой энергии при современном уровне развития технических средств и экологических

норм. Технический потенциал (W_T) зависит от параметров ВЭУ, скорости ветра на уровне ступицы ветроколеса, а также площади (S_T), пригородной для возведения ветроэнергетической установки (ВЭУ).

$$W_T = W_{\text{ВП}} \cdot C_p \cdot \eta_{\Gamma} \cdot \eta_p \cdot S_T / S, \quad (9.3.3.10)$$

где, C_p – коэффициент использования энергии ветра (ветроколесо преобразует в полезную работу только часть ветровой энергии, подводимой к нему), зависящий от скорости ветра, изменяется от максимального значения по Жуковскому – Бенцу 0,593 до минимального 0,05. Достигнутое максимальное значение составляет 0,4 – 0,45; η_{Γ} и η_p соответственно коэффициент полезного действия генератора и редуктора; S_T – площадь региона.

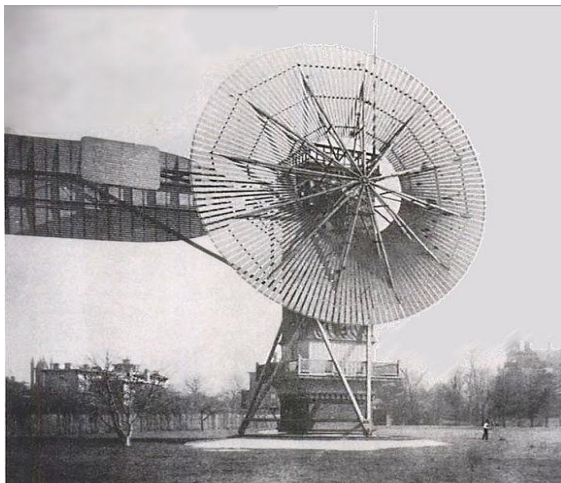
По оценкам специалистов величина этой площади, в зависимости от местности, может колебаться от 10 до 30 % от всей площади региона. При этом, технический потенциал соответственно составит от 3 до 9% от валового ветрового потенциала.

Экономический потенциал ветровой энергии– это величина выработки электроэнергии ВЭУ, получение которой оправдано при существующих ценах на строительно-монтажные работы, оборудование, производств, передачу электроэнергии и соблюдении экологических норм. В докладе Консультативного совета ФРГ по глобальным проблемам (Word in Transition –Towards Sustainable Energy Systems, 2003) подсчитано, что мировой технический потенциал ветровой энергии на суше и в прибрежных акваториях составляет 10^{21} Дж / год. Авторы доклада делают предположение, что до 14% этого потенциала можно реализовать на устойчивой основе и получать в долгосрочной перспективе до $140 \cdot 10^{18}$ Дж/год (39 ТВт·час/год) электроэнергии.

9.3.3.2. Типы и характеристики ветроэнергетических установок

Ветряные механизмы использовались в Персии за 200 лет до нашей эры. Однако первые ветряные мельницы были построены лишь в седьмом веке в Иране (Sistan, Iran). Они представляли собой вертикальную ось с 6 - 12 лопастями прямоугольной формы, изготовленными в виде паруса с тростниковым или тканевым покрытием. Они использовались для помолки зерна и перекачивания воды.

Первое упоминание о создании ветрогенератора относится к 1887 году. Он был разработан Джеймсом Блайтом (James Blyth) в Шотландии и обеспечивал зарядку аккумуляторных батарей. Первая автоматизированная ветроэнергетическая установка (ВЭУ) мощностью 12 кВт для производства электроэнергии была создана Чарльзом Ф. Брашем (Charles F.Brush) в 1888 году в США в Кливленде, Огайо (Cleveland, Ohio). ВЭУ состояла из ротора диаметром 17 м, установленного на 18-метровой башне и весила 36 тонн. Она медленно поворачивалась, так как имела 144 лопасти и использовалась для подзарядки аккумуляторных батарей, либо для питания ламп и различных двигателей в лаборатории Браша (Рисунок 9.3.3.7).



Источник: <http://www.windmachine.biz/page/15/>

Рисунок 9.3.3.7. ВЭУ Чарльза Браша

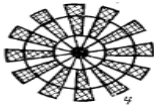


Источник: <http://www.energiepark-druiberg.de>

Рисунок 9.3.3.8. ВЭУ Поль ля Кура (1891)

В 1891 году датский ученый Поль ля Кур сконструировал ВЭУ для выработки электроэнергии, которая затем использовалась для получения водорода (рисунок 9.3.3.8). Построенная им ВЭУ в 1896 году стала первой электростанцией в деревне. В первой четверти 20 века в Дании шло активное распространение ВЭУ как источников электроэнергии для индивидуального пользования. К 1908 году было построено 72 ВЭУ мощностью от 5 до 25 кВт. В период с 1887 года по настоящее время были сконструированы и предложены и разработаны различные конструкции ВЭУ. Анализ конструкций ВЭУ показал, что ВЭУ в первую очередь следует классифицировать по двум основным признакам: геометрическим характеристикам ветроколеса и его положению относительно направления ветра (таблица 9.3.3.1).

Таблица 9.3.3.1. ВЭУ с основными типами и ориентацией оси вращения ветроколеса

№	Тип ветроколеса	Конфигурация ветроколеса	C_p	Ориентация оси вращения
1	Двухлопастное		0,35	Горизонтальная ось вращения
2	Трехлопастное		0,4	Горизонтальная ось вращения
3	Многолопастное		0,25	Горизонтальная ось вращения
4	Парусного типа		0,3	Горизонтальная ось вращения
5	Дарье		0,35	Вертикальная ось вращения

Продолжение таблицы 9.3.3.1

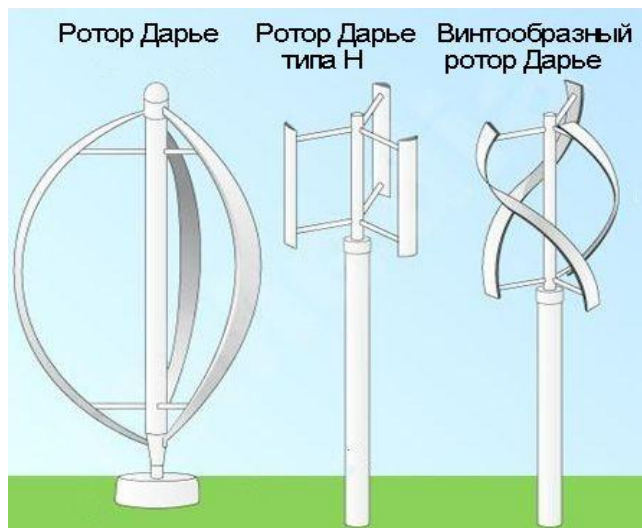
6	Геликоидный		0,4	Вертикальная ось вращения
7	Савониуса		0,25	Вертикальная ось вращения
8	Лопастное		0,3	Вертикальная ось вращения
9	Репеллерный с вихрепреобразователем		0,45-0,5	Горизонтальная ось вращения

Исследования, проведенные датскими учеными, показали, что для ВЭУ с горизонтальной осью вращения наиболее оптимальным решением является использование трехлопастного ветроколеса (таблица 9.3.3.1, позиция 2). Это решение признано всеми производителями ВЭУ и на их долю приходится более 98% от всех, производимых в мире ВЭУ. Достоинства этих ВЭУ: высокое значение коэффициента использования энергии ветра, плавность хода, низкий уровень вибрации и шума. В 1931 году французский инженер Дарье изобрел особый тип ВЭУ с вертикальной осью, эффективность которого не зависела от направления ветра (рисунок 9.3.3.9). К тому же, новая конструкция позволяла размещать генератор и редуктор не наверху башни, а на земле. Среди ВЭУ с вертикальной осью вращения, эта конструкция получила промышленное применение, и на ее долю в настоящее время приходится около 2% от всех производимых в мире ВЭУ (рисунок 9.3.3.10). Существенный недостаток этих ВЭУ – необходимость приведения в работу (разворот ветроколеса) за счет внешнего источника электроэнергии.



Источник: <http://www.final-yearproject.com/2014/02/vertical-axis-wind-turbine.html>

Рисунок 9.3.3.9. ВЭУ Дарье (1931 год)



Источник: <http://vetrogenerator.com.ua/vetrogenerator/vertikal/55-vetrogeneratory-s-rotorom-dare.html>

Рис. 9.3.3.10. Варианты конструкций ВЭУ Дарье.

Различают ВЭУ по области применения: предназначенные для работы в составе электроэнергетических систем (сетевые) и для использования в малой энергетике.

На рисунке 9.3.3.11 приведены данные ведущих в мире производителей сетевых ВЭУ, на долю которых пришлось 77,4% от объема мировых поставок в 2012 году. Эти фирмы в основном производят сетевые ВЭУ с горизонтальной осью вращения, которые имеют ряд общих признаков (рисунок 9.3.3.12).

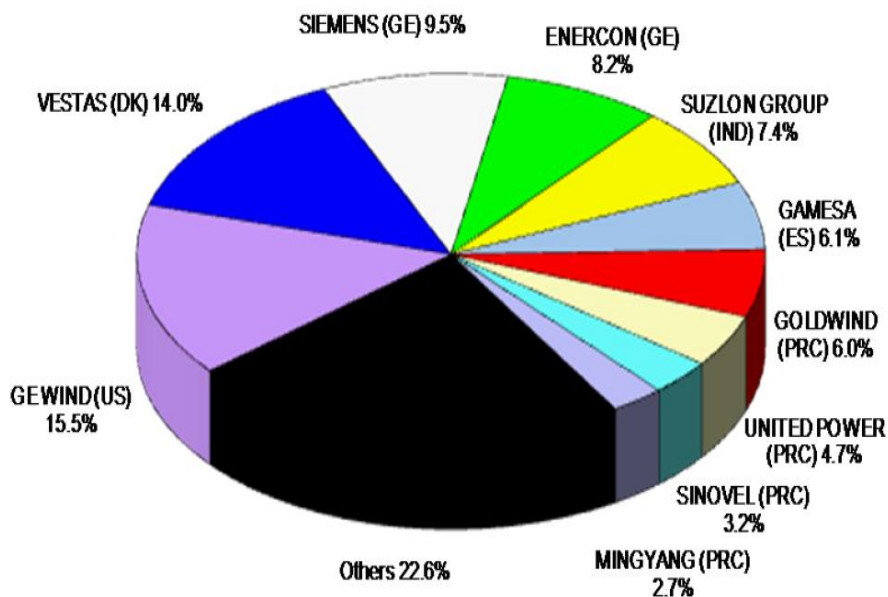
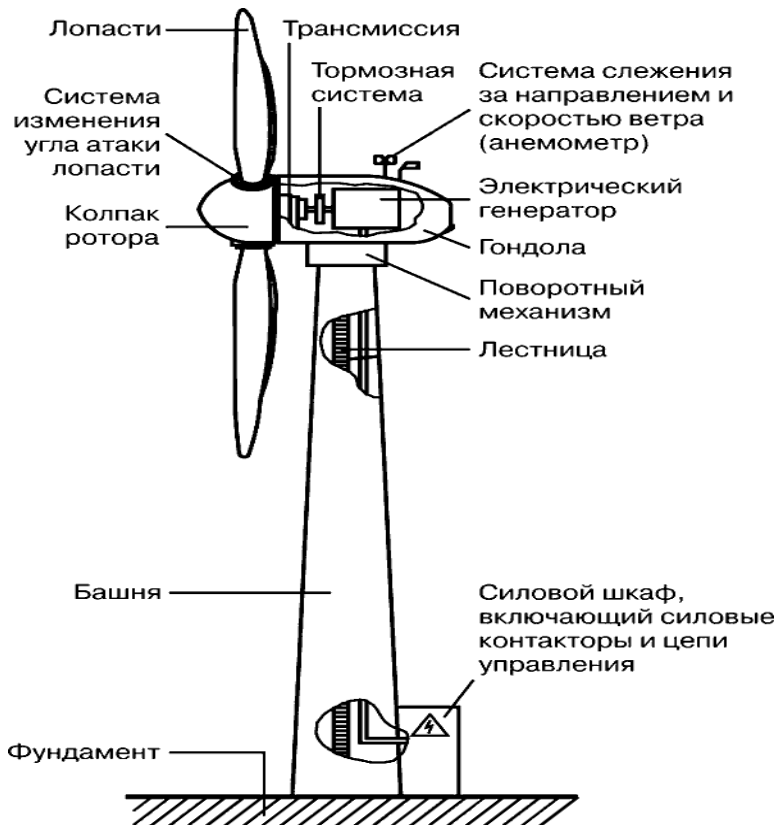


Рисунок 9.3.3.11. Распределение долей мирового рынка между производителями ВЭУ



Источник: http://www.esta.mk.ua/Windenergy_ru.html

Рисунок 9.3.3.12. Конструкция сетевой ВЭУ с горизонтальной осью вращения

ВЭУ - это полностью автоматизированная автономная энергетическая установка. Система управления ВЭУ работает автономно по заданному алгоритму, но имеет также связь с системой управления более высокого уровня – электроэнергетической системой, в которой она функционирует. Последняя контролирует и может взять управление ВЭУ на себя. При функционировании ВЭУ, вращающий момент от ветроколеса передается через трансмиссию (муфта и редуктор) на вал электрического генератора. От генератора через преобразователь и

трансформатор, электрическая энергия передается в электроэнергетическую систему. Ниже, кратко рассмотрим процесс автоматического управления ВЭУ.

На основе информации от системы слежения за направлением и скоростью ветра система управления ВЭУ при достижении стартовой скорости ветра ($v_{\text{нач}}$) от 2,5 до 4 м/сек, подключает ВЭУ к электрической системе и ВЭУ выдает электроэнергию в электроэнергетическую систему (рисунок 9.3.3.13). Далее с увеличением скорости ветра возрастает мощность ветрового потока (выражение 9.3.3.5), что приводит к росту электрической мощности, выдаваемой ВЭУ в электрическую сеть. Это продолжается до достижения номинальной скорости ветра, при которой мощность ВЭУ достигает номинальной $P_{\text{ном}}$ (формула 9.3.3.11).

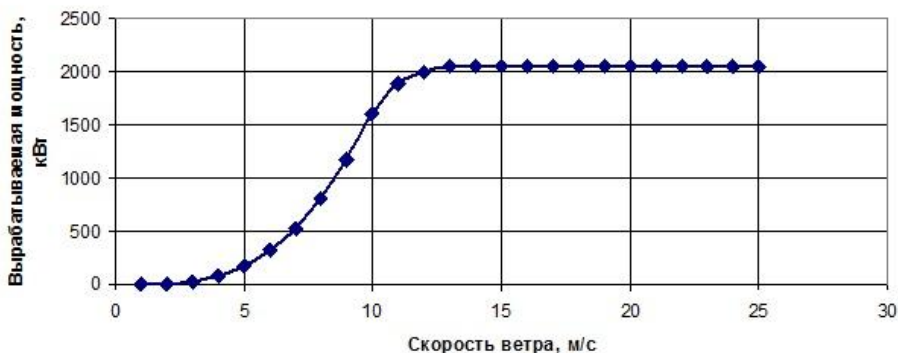


Рисунок 9.3.3.13. Зависимость выдаваемой мощности ВЭУ типа V80 (Vestas) от скорости ветра (pitch-регулирование).

$$P_{\text{ном}} = 0,3925 \cdot p \cdot C_p \cdot D^2 \cdot v_{\text{ном}}^3 \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{ген}} \quad (9.3.3.11)$$

В диапазоне скоростей ветра от номинальной ($v_{\text{НОМ}}$) до конечной ($v_{\text{КОН}}$), составляющей от 25 до 34 м/сек в зависимости от производителя ВЭУ, мощность ВЭУ остается неизменной. Существует два способа регулирования мощности ВЭУ.

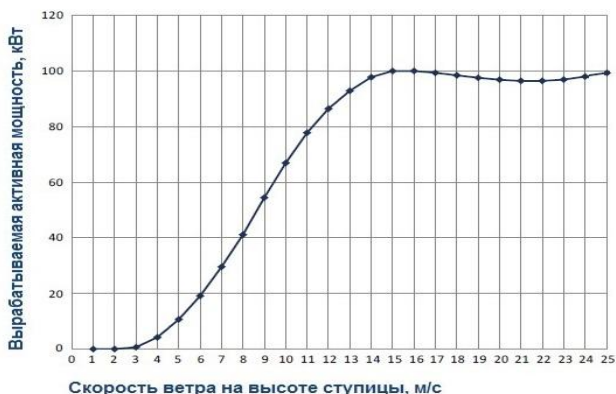
Первый способ - поворотом лопастей ветроколеса посредством приводных электродвигателей относительно направления ветра. При этом изменяется «угол атаки», то есть угол, под которым ветер набегает на лопасти ветроколеса и от которого зависит «подъемная» сила лопасти ветроколеса и, следовательно, мощность, которую ВЭУ отдает в электрическую сеть. Этот способ получил название pitch-регулирования (рисунок 9.3.3.14).



Источник: <http://usuaris.tinet.cat/zefir/pitch.htm>

Рисунок 9.3.3.14. Pitch-регулирование ВЭУ

Второй способ (stall-регулирование) заключается в том, что профиль лопасти ветроколеса выполняется различным по длине. В результате на отдельных частях лопастей наступает срыв потока воздуха и их подъемная сила уменьшается. В этих ВЭУ принудительно мощность не регулируется, что считается их недостатком. Достоинство состоит в том, что не требуется сложный механизм поворота лопастей ветроколеса.



Источник: http://www.northernpower.com/wp-content/uploads/2014/09/brochure-NPS100-21-Arctic_EU-online.pdf

Рисунок 9.3.3.15. Внешний вид и зависимость вырабатываемой активной мощности ВЭУ модели NPS 100-21Arctic от скорости ветра на высоте ступицы (stall- регулирование)

Однако, практически во всех мощных (сетевых) ВЭУ, используется pitch-регулирование мощности. При изменении направления ветра поворотный механизм разворачивает ветроколесо перпендикулярно направлению ветра. При достижении конечной скорости ветра, ВЭУ отключается от электрической сети. Эксплуатация ВЭУ при больших скоростях ветра нецелесообразна, так как скорости ветра более 34 м/сек маловероятны, а давление на ветроколесо пропорционально ометаемой поверхности. Эта сила

давления пытается опрокинуть ВЭУ. При остановленной ВЭУ площадь, на которую давит ветер, равна сумме площадей лопастей ветроколеса. Эта сумма в десятки раз меньше площади ометаемой поверхности. Поэтому неработающие ВЭУ выдерживают скорости ветра до 60-80 м/сек (так называемая буревая скорость), при которых они не должны разрушиться.

В ВЭУ в качестве генераторов используются асинхронные и синхронные машины. Ряд фирм, в частности Vestas, производят ВЭУ на основе асинхронных машин. В первых поколениях ВЭУ использовались асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором и конденсаторами для компенсации реактивной мощности, потребляемой генератором на холостом ходу, с контакторной схемой коммутации (рисунок 9.3.3.16а).

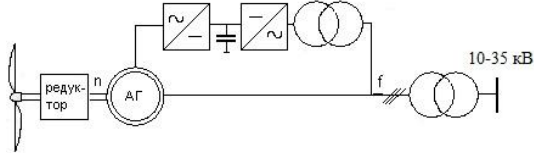
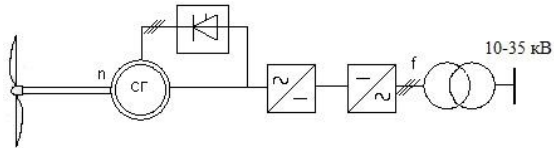
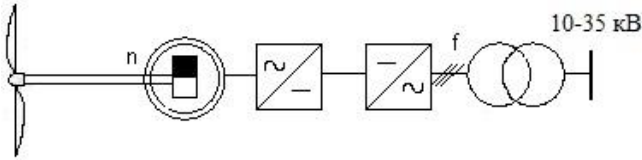
Схемы с асинхронным генератором (АГ)
а) АГ с короткозамкнутым ротором  $n = 60 \cdot (1+s) \cdot f/p$ Реактивная мощность потребляется
б) АГ с двойным питанием  $n \approx 60 \cdot (0.8-1.2) \cdot f/p$ Реактивная мощность регулируется
Схемы с синхронным генератором (СГ) и вставкой постоянного тока
в) СГ с традиционной системой возбуждения  $n \approx 60 \cdot (0.8-1.2) \cdot f/p$ Реактивная мощность регулируется
г) СГ с постоянными магнитами  $n \approx 60 \cdot (0.6-1.2) \cdot f/p$ Реактивная мощность регулируется

Рисунок 9.3.3.16. Некоторые наиболее распространенные электрические схемы ВЭУ

Серьезным недостатком таких схем являлось то, что при работе ВЭУ асинхронный генератор потребляет из электрической сети реактивную мощность. Как известно, баланс реактивных мощностей определяет уровень напряжений в электроэнергетических системах, что в ряде режимов эксплуатации системы негативно сказывалось на показателях качества электроэнергии. В последующих поколениях в ВЭУ использовалась асинхронная машина с двойным питанием, что обеспечивало выдачу или потребление реактивной мощности в зависимости от необходимости (рисунок 9.3.3.17).

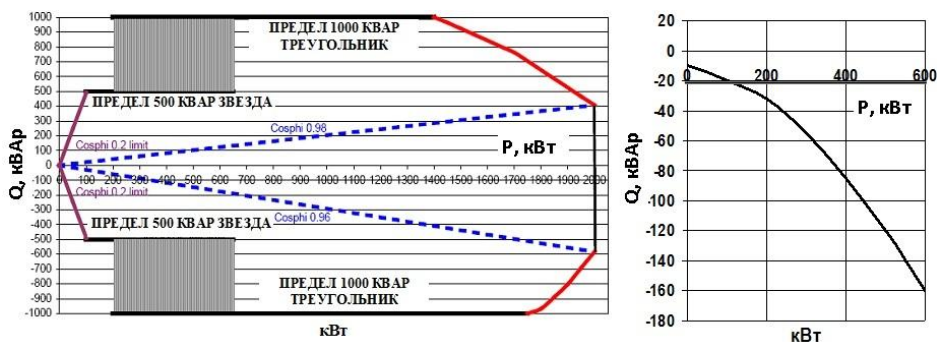


Рисунок 9.3.3.17. Диапазон регулирования реактивной мощности при применении асинхронного генератора с двойным питанием в ВЭУ V80 фирмы Vestas

Ряд фирм, в частности Enercon, используют синхронный генератор (рисунок 9.3.3.16в). ВЭУ на базе синхронного генератора имеют ряд достоинств перед ВЭУ на основе асинхронной машины. Так, стартовая скорость ВЭУ на основе синхронного генератора несколько ниже, а конечная выше, чем у ВЭУ на основе асинхронных генераторов (таблица 9.3.3.2), что несколько увеличивает выработку электроэнергии, отсутствует громоздкий редуктор. Как известно, редуктор - источник шума ВЭУ. Весьма перспективна концепция ВЭУ на основе синхронного генератора с постоянными магнитами,

обладающая более простой конструкцией и широким диапазоном скоростей ветроколеса (рисунок 9.3.3.16г). Реализацию этой концепции, названную Windformer, предлагает фирма АББ.

Таблица 9.3.3.2. Технические данные ВЭУ фирмы «Enercon»

Тип	Р _{уст} , кВт	Высота ступицы, м	Скорость м/сек			Диаметр ротора, м	Ометаемая поверхность, м ²
			V _{нач}	V _{ном}	V _{кон}		
E44	900	45-55	3	16	28-34	44	1521
E48	800	50-76	3	13	28-34	48	1810
E70	2300	57-113	2	15	28-34	71	3959
E82	2300	78-138	2	13	28-34	82	5281
E92	2350	84-138	2	14	28-34	92	6648
E101	3050	99-149	2	13	28-34	101	8012
E115	3000	124	2	12	28-34	115,7	10515,5
E126	7580	135	3	17	28-34	127	12668

Планы Глобального мирового проекта Wind Force 12 по вводу ветроэнергетических мощностей (производство 12% потребляемой электрической энергии в мире посредством ВЭУ), представлены в таблице 9.3.3.3.

С середины 80-тых годов прошлого века по настоящее время в мире ВЭУ с горизонтальной осью вращения сменилось примерно 8 поколений. Каждое из последующих поколений отличается от предыдущих: большей единичной установленной мощностью от 20-30 до 8000 кВт; степенью автоматизации; решением технических и

экологических проблем; более высокой производительностью и более низкой себестоимостью выработанной электроэнергии.

Таблица 9.3.3.3. Рубежи развития мировой ветроэнергетики 2010-2020 гг. при 12% сценарии (Wind Force 12: Report of European wind association and Greenpeace).

Год	Годовой ввод ВЭУ, ГВт	Стоимость капитальных затрат на ВЭУ, евро/кВт	Суммарная мощность ВЭУ в мире, ГВт	Годовая выработка электроэнергии ВЭУ, ТВт·час	Мировое потребление электроэнергии в мире, ТВт·час	Доля ВЭУ в выработке электроэнергии, %
2002	7,3	823	32	64,5	16233	0,4
2004	11,3	770	52	110	17110	0,64
2006	17,6	721	84	184	18035	1,02
2008	27.6	670	134	293	19010	1.54
2010	39.7	623	207	452	20037	2.26
2012	57.2	594	311	764	21040	3.63
2014	82.3	566	462	1134	22093	5,13
2016	109	540	666	1633	23198	7.04
2018	138	516	929	2278	24359	9.35
2020	159	497	1254	3054	25578	11.72

Еще одним важным направлением в области ветроэнергетики являются ВЭУ малой мощности (0,05-100 кВт).

Как, правило, они предназначены для автономной работы для обеспечения электроэнергией удаленных потребителей или электроснабжения «умного дома». В этих случаях они функционируют с другими источниками энергии: водными, солнечными или базисным источником, например аккумуляторная

батарея. В ВЭУ малой мощности применяются два вида ориентации на ветер: автоматическая (рисунок 9.3.3.18а) и механическая (рисунок 9.3.3.18б) при помощи хвостового оперения (преимущественно при мощности ВЭУ до 10 кВт). При автоматической ориентации на гондоле устанавливается анемометр. Он также, как и в мощных ВЭУ, регистрирует направление и скорость ветра, и при его изменении передает сигнал на двигатель поворотного механизма. Механическая ориентация на ветер осуществляется при помощи хвостового оперения, выполняющего роль своеобразного паруса, поворачивающего лопасти перпендикулярно набегающему воздушному потоку.



а)



б)

Источник: <http://www.helica.com.ua/information/article2.htm>

Рисунок 9.3.3.18. ВЭУ малой мощности с автоматической (а) и механической (б) ориентацией на ветер

В мире наблюдается совершенствование технологий и расширение области применения малых ВЭУ.

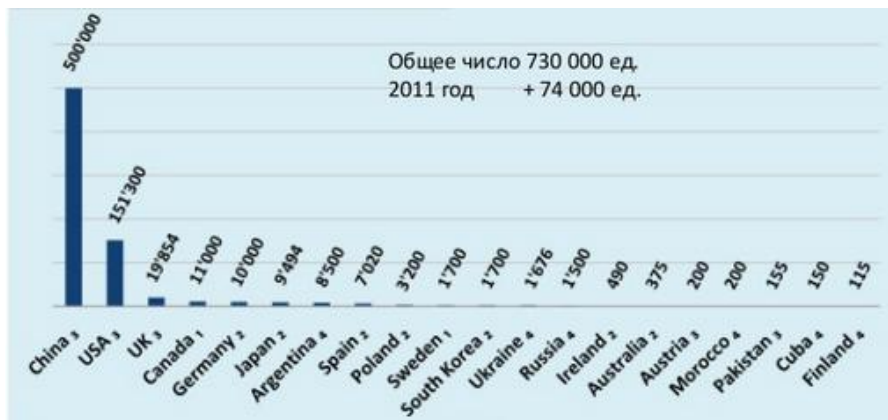


Рисунок 9.3.3.19. Распределение в мире малой ветроэнергетики

9.3.3.3 Методика расчета годовой выработки электрической энергии ветроэнергетической установкой и оценка ее окупаемости.

Для систематизации характеристик ветровой энергии в конкретном регионе с целью ее эффективного использования, разрабатывается ветровой кадастр, представляющий собой совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра, позволяющих определить энергетическую ценность ветра и режимы работы ВЭУ. Данные наблюдений за ветровым режимом обычно содержат следующую информацию:

- географические координаты, высоту метеостанции над уровнем моря, открытость флюгера по различным направлениям;
- распределение вероятностей ветра по восьми или шестнадцати направлениям (рисунок 9.3.3.20), а также данные о вероятности штиля для 12 месяцев и средней за весь год;
- *среднемесячные (для каждого из 12 месяцев) и среднегодовые скорости ветра;*
- распределение ветра по градациям скорости для каждого из 12 месяцев и среднее за весь год.

Информация о распределении ветра приводится к высоте флюгера, равной 10 метров, высота флюгера – h_{ϕ} (рисунок 9.3.3.21), и усредняется по ряду значений и по срокам.

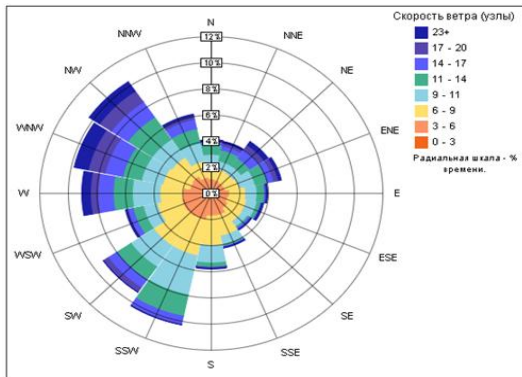


Рисунок 9.3.3.20. Роза ветров

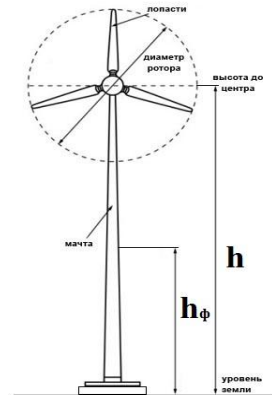


Рисунок 9.3.3.21. Внешний вид ВЭУ

Для получения достоверных данных о скоростях ветра, достаточно ограничиться рассмотрением 10-летних объемов выборки наблюдений. Ступица ветроколеса ВЭУ находится на высотах h до 140 м (рисунок 9.3.3.21).

При установившемся ветровом потоке скорость ветра возрастает с увеличением высоты над поверхностью Земли. Следует отметить, что достоверное определение скорости ветра на уровне ступицы ветроколеса расчетным путем это очень сложная задача, так как скорость ветра в атмосфере зависит от многих факторов: сезона года, места расположения ВЭУ (равнинная местность, берег моря, море) и так далее. В общем виде скорость ветра на высоте h определяется через скорость ветра v_{ϕ} на высоте флюгера h_{ϕ} по выражению:

$$v = v_{\phi} \cdot \left(\frac{h}{h_{\phi}} \right)^m, \quad (9.3.3.12)$$

где m – коэффициент (показатель класса поверхности), характеризующий степень возрастания ветра с высотой над поверхностью земли.

Результаты расчетов отношения средних скоростей на различных высотах к средней скорости на высоте флюгера $h_{\phi} = 10$ м и показателя “ m ” для различных сезонов года, справедливые для условий равнинной местности (степь, тундра, пустыня) приведены в Таблице 9.3.3.4.

Таблица 9.3.3.4. Коэффициент возрастания средней скорости ветра с высотой $v(h) / v(h_{\phi})$ и показатель степени m^*)

Сезон	Высота, м						m
	10	20	40	60	80	100	
Зима	1	1,12	1,26	1,35	1,43	1,50	0,17
Весна	1	1,17	1,36	1,50	1,59	1,66	0,22
Лето	1	1,18	1,40	1,55	1,67	1,76	0,24
Осень	1	1,12	1,26	1,35	1,43	1,50	0,17
Год	1	1,15	1,32	1,44	1,53	1,60	0,20

*) Для побережий озер и морей, а также верхних частей склонов переменную часть коэффициента, стоящую после запятой, следует уменьшить в 1,5 раза.

Ориентиром для выбора площадки сооружения ВЭУ и ветроэлектростанции являются характеристики классов местности по ветроэнергетике, предложенные в работах проф. Безруких (таблица 9.3.3.5).

Таблица 9.3.3.5. Характеристика классов местности по ветроэнергетике

Номер класса	Характеристика класса	Удельная мощность на высоте 50 м, Вт/м ²	Среднегодовая скорость на высоте 50 м, м/сек
1	Бедный	0-200	0,0-5,6
2	Малорентабельный	200-300	5,6-6,4
3	Средний	300-400	6,4-7,0
4	Хороший	400-500	7,0-7,5
5	Отличный	500-600	7,5-8,0
6	Выдающийся	600-800	8,0-8,8
7	Великолепный	> 800	> 8,8

Важнейшими эксплуатационными показателями, характеризующими работу ВЭУ являются коэффициент использования установленной мощности (K_y) и удельная выработка электроэнергии на единицу ометаемой поверхности в год ($K_{уд}$). Коэффициент использования установленной мощности представляет собой отношение фактической средней мощности ВЭУ в течение определенного промежутка времени, обычно года, к номинальной мощности ВЭУ (рисунок 9.3.3.13), и определяется по выражению:

$$K_y \approx \frac{W_{год}}{P_{ном}(8760 - T_{простоя})}, \quad (9.3.3.13)$$

где, $W_{год}$ – годовая выработка электроэнергии за год;

$T_{простоя}$ – число часов вынужденного аварийного простоя (час).

Показатель – удельная выработка электроэнергии на единицу ометаемой поверхности в год является обобщенной характеристикой ВЭУ, условий её работы и эксплуатации.

$$K_{y0} = \frac{W_{\text{год}}}{\pi \cdot R^2} , \quad (9.3.3.14)$$

где, $\pi \cdot R^2$ – ометаемая поверхность, равная площади круга, которую описывают вращающиеся лопасти (рисунок 9.3.3.21).

Инженерная методика расчета годовой выработки электроэнергии ВЭУ

Знание среднегодовой скорости ветра (v_{cp}) на уровне ступицы ветроколеса ВЭУ и зависимости активной мощности выдаваемой ВЭУ от скорости ветра (рисунок 9.3.3.13), позволяют по методике Рейлиха, рассчитывать годовую выработку электроэнергии.

$$f_{y,i} = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_i - 0,5}{v_{cp}}\right)^2\right) - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{v_i + 0,5}{v_{cp}}\right)^2\right);$$

$$W_{\text{год}} = \sum_{t=0}^T f_{y,i} \cdot P_i \cdot t , \quad (9.3.3.15)$$

где v_i – действительная скорость ветра; $f_{y,i}$ – частотное распределение по скоростям; P_i – мощность, выдаваемая ВЭУ в сеть при данной скорости ветра.

Упрощенная инженерная методика расчета выработки электроэнергии ВЭУ

На рисунке 9.3.3.22 приведены зависимости коэффициента использования установленной мощности ВЭУ основных типов ВЭУ от среднегодовой скорости ветра на уровне ступицы ветроколеса для основных типов ВЭУ, рассчитанные с использованием технических характеристик ВЭУ.

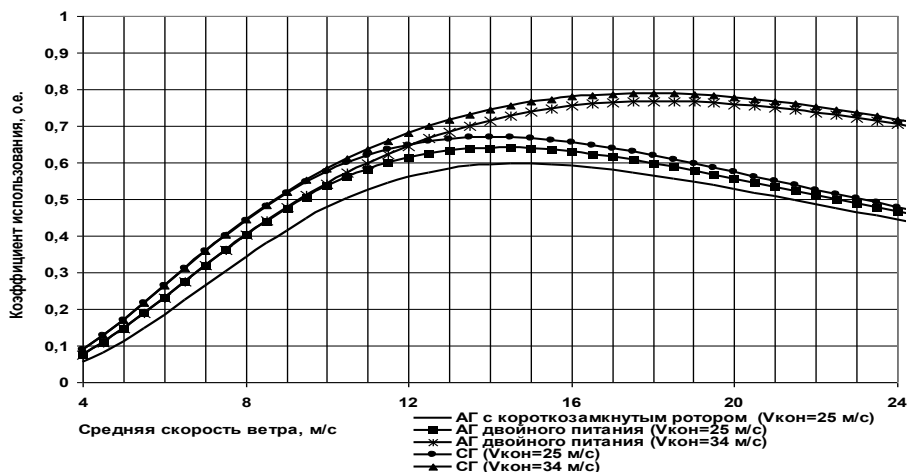


Рисунок 9.3.3.22. Зависимости коэффициента использования установленной мощности ВЭУ от среднегодовой скорости ветра на уровне ступицы ветроколеса для основных типов ВЭУ

Годовая выработка электроэнергии ветропарком определится по выражению:

$$W_{год} = K_{исп} \cdot K_{\theta} \cdot n \cdot P_{ном} \cdot T_{год}, \quad (9.3.3.16)$$

где K_{θ} - коэффициент, учитывающий взаимное влияние ВЭУ;

n - число ВЭУ в составе ветропарка.

Более точно выработку электроэнергии ВЭУ можно рассчитать с помощью «Атласа ветров» и программ WindPro, WASP, ENERCON.

Сроки окупаемости ВЭУ и ветропарков рассматриваются для каждого случая отдельно. Они обусловлены рядом факторов:

- стоимостью сооружения ветропарка, которая зависит от стоимости ВЭУ; проектных работ; прокладки электрической сети; стоимости земли и так далее;

- среднегодовой скорости ветра на высоте ступицы ветроколеса, что определяет количество выработанной электроэнергии (таблица 9.3.3.6).

- льготами, предоставляемыми в стране для возобновляемой энергетики и так далее.

Таблица 9.3.3.6. Выработка электроэнергии ВЭУ Е-126/7,580MW фирмы «Enercon» при конечной скорости работы ВЭУ - 34м/сек.

Среднегодовая скорость ветра, м/с	4	6	8	10	12
Выработка электроэнергии, млн. кВт* час	13	18	29,8	40	45

9.3.3.4 Подключение и работа ветроэнергетических установок в составе электроэнергетических систем.

В настоящее время нет установившейся трактовки терминов касающихся ВЭУ и комплексов на их основе. В основном используются следующая классификация: ВЭУ, ветропарк, офшорные ветропарки, большие офшорные ветропарки и ветроэлектростанции (ВЭС). Ветропарк – это когда две и более ВЭУ независимо друг от друга подключены к сети. Здесь можно привести аналогию с лесным парком, когда деревья растут в лесу. Ветроэлектростанция должна обладать признаками традиционной электростанции: иметь общее распределительное устройство, систему управления и прочее. Поэтому, так называемые, офшорные ветропарки это фактически ветроэлектростанции (рисунок 9.3.3.23).

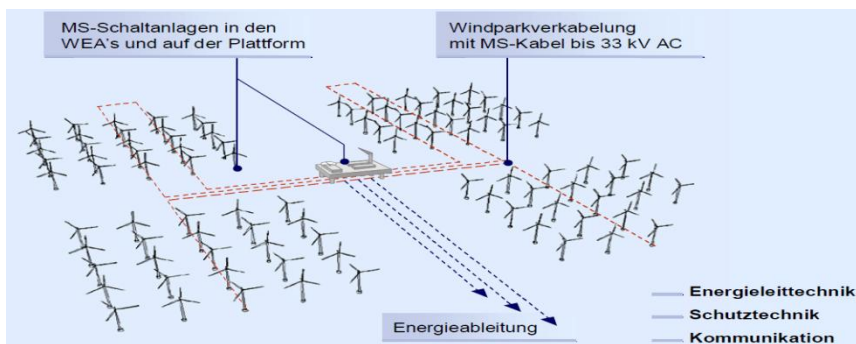


Рисунок 9.3.3.23. Ветроэлектростанция морского базирования (Power Transmission and Distribution)

С ростом мощностей ВЭУ и ветропарков технические характеристики электрической сети приобретают все более возрастающее значение, наряду с такими характеристиками как ветропотенциал и экологическая совместимость.

Работа ВЭУ и ветропарков в составе электрических сетей и систем оказывает влияние на: 1) качество электроэнергии (нормы и директивы); 2) загрузку сетей (технические границы); 3) загрузку сетей при коротких замыканиях; 4) баланс мощностей и энергий.

Подключение ВЭУ и ветропарков к электрической сети может превысить её технические возможности и стать причиной дополнительных затрат на усиление сети или наоборот. Таким образом, на стадии проектирования следует оценить: возможность подключения ветропарка к сети; воздействие ветропарка на электрическую сеть при параллельной работе сети и ВЭУ.

Мощность подключения ВЭУ к электрической сети основывается на: соотношении $S_{ВЭУ}$ и $S_{КЗ}$ ($S_{ВЭУ}/S_{КЗ} \geq 0,02$); комплексном расчете перетоков мощности в электрической сети; изменениях напряжения при коммутациях; расчете токов короткого замыкания; оценке фликера и высших гармоник. Эти оценки образуют в Германии стандарт и в большинстве случаев позволяют оценить возможность подключения ВЭУ к электрической сети.

Следует отметить, что первое требование в условиях слабых сетей не всегда выполнимо. В этих случаях необходимо принимать во внимание особенности ВЭУ. В частности, если использовать ВЭУ, в которых решены проблемы с выдачей или потреблением реактивной мощности, стабилизацией напряжения, отключением ВЭУ при коротких замыканиях, то появляется возможность подключения мощных ВЭУ к этим электрическим сетям. Такой анализ целесообразно проводить на математической модели. Для исследования динамических и статических режимов в ЭЭС

используется программный модуль-дополнение PSAT (Power System Analysis Toolbox). Данный модуль является дополнением к MATLAB® и содержит в своей библиотеке моделей, основанные на SIMULINK® модели ветра и ветроэнергетических установок.

Представляет практический интерес рекомендации специалистов Deutsches Windenergie Institut GmbH по предельным мощностям ВЭУ и ветропарков, подключаемых к сетям различного напряжения (U). Рост предельных мощностей ВЭУ и ветропарков с увеличением напряжений сетей, к которым они подключаются, определяется мощностью короткого замыкания (таблица 9.3.3.7).

$$S_{кз} = U^2 / Z_{кз} \quad (9.3.3.17)$$

где U - номинальное напряжение сети; $Z_{кз}$ – эквивалентное сопротивление от точки в энергосистеме, к которой подключена ВЭУ, до той точки в энергосистеме, где мощность источника является бесконечно большой по отношению к мощности ВЭУ.

Таблица 9.3.3.7. Предельные мощности ВЭУ и ветропарков, подключаемых к электрическим сетям различного напряжения

Тип сети	U_n , кВ	Тип ветроэнергетических установок	Предельные мощности, МВт
Низкое напряжение	< 1	ВЭУ малой и средней мощностью	До 0,3
Среднее напряжение	> 1 ÷ < 35	ВЭУ средней и большой мощностью, ветропарки	До 2 - 5
Непосредственное подключение к шинам среднего напряжения		Ветропарки и ветроэлектростанции	10 – 40
Высокое напряжение	> 35	Ветропарки и ветроэлектростанции	До 100
Сверхвысокое напряжение	> 220	ВЭС большой мощности	> 500

Новым направлением современной ветроэнергетики являются ВЭС морского базирования. Бурный рост этого направления в мире обусловлен высокой степенью приватизации и стоимостью земли, более высоким потенциалом над морем, возможностью решения ряда экологических проблем. Удельная стоимость капитальных вложений в ВЭС морского базирования (в 1,7-2) раза выше береговых. Рентабельными считают ВЭС, удаленные от берега не далее 40 км и установленные на глубине шельфа не более 25-35 м. Выработка морских ВЭС оказывается на 25-40% выше, чем на суше при их удалении от берега на 3-5 км и более (расстояние, на котором слабый сухопутный ветер успевает трансформироваться в более сильный морской). Установка ВЭС на шельфе в непосредственной близости от берега (до 1-1,5 км) оказывается малоэффективной из-за недостаточно высокого ветропотенциала. Мощность ВЭС морского базирования, как правило, составляет до 1000 МВт. Передача энергии осуществляется через звено переменного тока или постоянного тока. При мощностях более 300 МВт передача мощности через звено постоянного тока более эффективна (рисунок 9.3.3.24) .

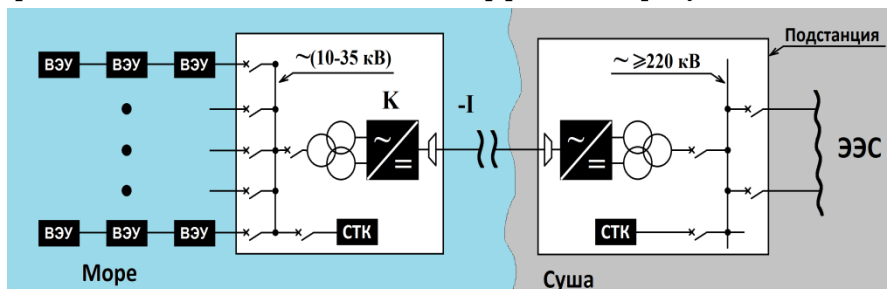


Рисунок 9.3.3.24. Упрощенная схема выдачи мощности от ветропарка морского базирования в электроэнергетическую систему через звено постоянного тока.

СТК это статический тиристорный компенсатор, который служит для компенсации реактивной мощности и высших гармоник тока, эмиттируемых конвертором (К). Конвертер осуществляет

преобразование электроэнергии с переменного тока на постоянный или наоборот.

9.3.3.5 Оценка экологичности технологий использования ветровой энергии для процесса существования застроенной окружающей среды.

Мировой опыт строительства и эксплуатации ВЭУ показал, что по сравнению с традиционными типами электростанций (тепловые, атомные и гидроэлектростанции), они являются экологически чистыми: их негативное влияние на окружающую среду, условия проживания и хозяйственную деятельность населения минимально и носит ограниченный характер. В качестве основных факторов воздействия ВЭУ на окружающую среду, как правило, рассматриваются:

- шум, низкочастотные звуковые колебания и радиопомехи от работающих ветровых турбин;
- изъятие земель, водных территорий и изменение естественного ландшафта местности при сооружении ВЭУ;
- влияние на миграцию и условия обитания рыб и птиц;
- аварии и пожары.



Источник: <http://www.rlocman.ru/wind/index.html?p=7>

Рисунок 9.3.3.25. Пожары на ВЭУ

Общественное мнение в отношении применения ВЭУ имеет важное значение в планировании широкого использования энергии ветра. Первоначальные исследования показали, что воздействие таких систем на застроенную окружающую среду относительно невелико по сравнению с обычными электростанциями. ВЭУ не требуют затопления больших площадей или нарушения естественных экологических условий, как это имеет место при сооружении гидроэлектростанций. Кроме того, они не имеют газовых отходов или тепловых излучений, как у систем, работающих на жидком или ядерном топливе.

ВЭУ мощностью 1 МВт сокращает ежегодные выбросы в атмосферу 1800 тонн CO₂, 9 тонн SO₂, 4 тонн оксидов азота.

В странах, где интенсивно используется энергия ветра (ФРГ, Дания, Нидерланды, США), установлены нормативы, определяющие предельный уровень шума при работе ВЭУ в жилых районах в дневное время - 50 дБ и в ночное время - 35 дБ. Кроме того, согласно принятым в этих странах нормативам, минимально допустимое расстояние ВЭУ от жилых домов должно быть не менее 300 м, от дорог 20-75 м, от линий электропередачи 39-52 м. Данные нормативы приведены для ВЭУ наземного базирования. Шумовое воздействие ветропарков морского базирования на жилые территории не рассматривается, так как они расположены на значительном удалении от берега в море.

Визуальное воздействие наиболее актуально в настоящее время и наиболее сложно поддается количественной оценке. В основном это неприятие людьми изменений в ландшафте из-за появления одной или нескольких, а иногда многих десятков ВЭУ. ВЭУ обычно располагаются на площадках, которые должны обеспечивать коммерческую доходность, поэтому они заметны. Реакция на вид ВЭУ очень субъективна. Ряд людей воспринимают их положительно,

как символ чистой энергии. В тоже время другие находят их нежелательным добавлением в окружающей среде. Для улучшения эстетичного вида ВЭУ во многих крупных фирмах работают профессиональные дизайнеры.

К действительно вредным визуальным воздействиям, которое поддается измерению и оценке, относится создание лопастями ВЭУ стробоскопического эффекта при низком закатном солнце. Более всего этот эффект проявляется в широтах, близких к полярным. Подобное влияние стараются исключить еще при проектировании и поиске площадки для ВЭУ. В случае невозможности решить этот вопрос жители, находящиеся в зоне «мелькания», могут претендовать на получение денежной компенсации за причиняемые неудобства. В то же время во многих странах мира ВЭУ вызывают положительные эмоции.

До недавнего времени считалось, что помехи радио- и телевизионному приему от ВЭУ незначительны, если избегать их строительства в одну линию по направлению к передающей станции или располагать на достаточном расстоянии. Если передача теле- и радиосигналов осуществляется через спутник, проблема отпадает автоматически. В последнее время в связи с ростом единичной мощности ВЭУ и соответственно с увеличением высоты ступицы обостряется вопрос грозозащиты лопастей ВЭУ. Лопасти первых ВЭУ выполнялись из металла или дерева. Металлические лопасти отражают радио- и телевизионные сигналы, а деревянные - поглощают их. Но из-за малого количества подобных агрегатов и их небольших размеров они не рассматривались как помеха для радио- и телесигналов. С ростом мощностей и размеров ВЭУ их лопасти почти повсеместно выполнялись и выполняются из стекловолокна, без каких-либо металлических включений, и поэтому они полупрозрачны для теле- и радиосигналов. С дальнейшим

увеличением размеров и мощностей ВЭУ до 2 МВт и более для защиты лопастей от ударов молнии внутри лопастей стали закладываться алюминиевые проводники довольно значительного сечения, по которым ток при ударе молнии уходил в землю. Такие лопасти становятся своего рода зеркалами для проходящих радио- и телесигналов. ВЭУ, оснащенная подобными устройствами, становится препятствием для сигналов военных радаров. Одновременно большие площади земель, особенно вдоль морских побережий и в прибрежных акваториях, стали служить площадками для крупных ветропарков. Эта тенденция приводит к столкновению интересов военных, наблюдающих с помощью радаров за прибрежной акваторией и воздушным пространством, и ветроэнергетики. В результате, например, в Великобритании усилились требования по ограничению строительства ветропарков вдоль побережий. В Норвегии, по оценкам экспертов, учет требований военных приведет к снижению потенциальных ветроэнергоресурсов на 50%. Узконаправленный электромагнитный луч радара «видит» все препятствия, включая дома, деревья и ВЭУ. Но зона позади ротора ВЭУ невидима для военных мониторов. Для уменьшения или полного устранения этого явления крупнейшие европейские фирмы-производители ВЭУ совместно с Европейской компанией по противовоздушной и космической обороне изучают вопросы как размещения ВЭУ в составе ветропарков рациональным образом, так и поиска оптимальной конфигурации проводников заземления внутри лопастей ВЭУ.

Еще одним негативным фактором является изымание земель, отведенных под строительство ВЭС, из землепользования. Однако при выборе места размещения учитывалась полезность изымаемой территории.

Исследования, проведенные в Нидерландах, показали минимальное влияние ВЭУ на орнитофауну. Для ВЭУ средних и больших размеров вероятность поражения мигрирующих птиц в дневное время оценивается в 3 %, при этом основная часть птиц пролетает гораздо выше уровня, достигаемого роторными лопастями. С другой стороны, считается, что для ночных и дневных мигрантов в погоду с плохой видимостью ВЭУ должны быть менее опасны, чем прочие высотные конструкции, созданные человеком (теле- и радиовышки, линии электропередачи, маяки и т.д.), так как в случае с ВЭУ, её крутящиеся лопасти создают эффект предупреждения.

Результаты аналитических и полевых исследований, проведенных в США, о характере возможного влияния ветроэнергетики на дикие растения и животных через изменение условий их обитания также показали, что девиация основных характеристик микроклимата в подветренной зоне ВЭУ не превышает величины естественных колебаний. Поскольку все микроклиматические изменения, последовавшие в результате сооружения ВЭУ, происходят в пределах, допустимых для сложившейся среды обитания, учеными был сделан вывод о незначительности их влияния на растительный и животный мир.

Таким образом, согласно данным большинства имеющихся в настоящее время исследований, возможное негативное влияние на растительный и животный мир ВЭУ является минимальным, и последствия их эксплуатации не могут наносить сколько-либо ощутимого вреда окружающей природной среде.

Следует признать, что на сегодняшний день существенной проблемой ветроэнергетики, требующей решения, является утилизация лопастей ветрогенераторов, состоящих из композитных материалов. Учитывая темпы развития ветроэнергетики и сроки

службы ВЭУ (около 25 лет), эта проблема наиболее остро проявится перед человечеством к 2020 году.

9.3.4 Практические вопросы и решения

1. Объясните физический процесс образования ветра.
2. Разъясните понятия валового, технического и экономического потенциалов ветряной энергии и приведите их основные показатели. Как связаны между собой эти три вида потенциалов ветровой энергии?
3. Выведите формулу мощности воздушного потока.
4. По методике Рейлиха рассчитайте годовую выработку электроэнергии для заданной ветроэнергетической установки.
5. Какие факторы следует учитывать при оптимизации размещения ветроэнергетических установок на заданной территории?
6. На какие две группы можно разделить существующие виды ветроэнергетических установок в зависимости от конструкции?
7. На какие два типа можно разделить существующие виды ветроэнергетических установок в зависимости от применяемых генераторов? Назовите основные достоинства и недостатки каждого типа.
8. Назовите важнейшую техническую характеристику ветроэнергетической установки.
9. Дайте разъяснение понятиям Stall- и Pitch-контроль.
10. На что оказывает влияние работа ВЭУ в составе энергосистемы?
11. Назовите основные факторы воздействия ВЭУ на застроенную окружающую среду.
12. Назовите достоинства и недостатки офшорных ветропарков.

13. Какая на Ваш взгляд основная экологическая проблема использования ВЭУ в мире, если такая существует?

Студент может также найти вопросы самоконтроля и задачи, которые можно решить по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU.

9.3.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)

1. "WINDPOWER – The Danish Way", 2009, CHAPTER 1: The Scientist, inventor and Teacher Poul la Cour, by Povl-Otto Nissen, M.A. (Physics Education), Chairmans if the Board, The Poul la Cour Museum's Friends. The Poul la Cour Foundation. Доступ по интернету: <http://www.poullacour.dk/>

2. Dietrich Lohrmann, "Von der östlichen zur westlichen Windmühle", *Archiv für Kulturgeschichte*, Vol. 77, Issue 1 (1995), pp.1-30

3. Price, Trevor J (3 May 2005). "James Blyth - Britain's First Modern Wind Power Engineer". *Wind Engineering* , 29 (3): 191–200.

4. "GWEC, Global Wind Report Annual Market Update"Доступ по интернету: <http://www.gwec.net/>

5. Geostrophic wind. *Glossary of Meteorology*. American Meteorological Society (2009)

6. Зубащенко Е.М. Региональная физическая география. Климаты Земли: учебно-методическое пособие. Часть 1. / Е.М. Зубащенко, В.И. Шмыков, А.Я. Немыкин, Н.В. Полякова. – Воронеж: ВГПУ, 2007. – 183 с

7. Thomas Ackermann. Wind power in power systems. John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, –England, 2005.

8. Siegfried Heier. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2006.

9. Siegfried Heier. Windkraftanlagen Systemauslegung Netzintegration und Regelung, 5. überarbeitete und aktualisierte Auflage 2009. Teubner Verlag. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden

10. Белей В.Ф. Классификация и способы подключения ветроэнергетических установок к электрической сети // Электрооборудование судов и электроэнергетика: Сб. науч. тр. – Калининград: изд-во КГТУ, 2007.-С.4

11. Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.: – ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010, 320 с

12. Fox Brendan. Engineering and Physical Sciences Research Council. In: IET Power and Energy Series. London: Institution of Engineering and Technology, 2007.

13. William Shepherd, Li Zhang. Electricity Generation Using Wind Power, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2011.

14. Jeremie Roux, Gerard Martin. Wind Turbines: Types, Economics and Development, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2010.

15. Cedrick N. Osprey. Wind Power: Technology, Economics and Policies, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2009.

16. Dick Bowdler, Geoff Leventhall. Wind Turbine Noise, Multi-Science Publishing Co. Ltd, 5 Wates Way, Brentwood, Essex CM15 9TB, United Kingdom, 2011.

17. Julio Usaola, Edgardo D Castronuovo. Wind Energy in Electricity Markets with High Wind Penetration, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2009.

18. Белей В.Ф., Шкицкий В.А. Экологические аспекты энергетики. Монография. – Калининград: КГТУ, 2004. – С. 82.

19. National Research Council. Environmental Impacts of Wind-Energy Projects. Washington, DC: The National Academies Press, 2007.

20. Jae-Kun Lyu, Jae-Haeng Heo, Jong-Keun Park, Yong-Cheol Kang. Article "Probabilistic Approach to Optimizing Active and Reactive Power Flow in Wind Farms Considering Wake Effects", *Energies* 2013, 6(11), 5717-5737; doi: 10.3390/en6115717.

21. Rob Gramlich, Michael Goggin. "What's Next for Wind Power", *The Electricity Journal*, Volume 26, Issue 2, March 2013, Pages 95–97.

22. Govinda R. Timilsina, G. Cornelis van Kootenb, Patrick A. Narbelc. Global wind power development: Economics and policies, *Energy Policy*, Volume 61, October 2013, Pages 642–652.

23. Ulsoy, A. Galip. Wind Whisperers: Understanding and Controlling the Power of the Wind. *Mechanical Engineering*. Sep2013, Vol. 135 Issue 9, Special section p1-1. 3/4p.

24. Joseph Wheatley. Quantifying CO2 savings from wind power, *Energy Policy* Volume 63, December 2013, Pages 89–96.

25. Fanchi, John R., Fanchi, Christopher J. *Energy in the 21st Century*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011.

26. Dumaine, Brian. Change is in the wind, Offshore. *Fortune*, 00158259, 10/7/2013, Vol. 168, Issue 6.

27. Tavner, Peter J. *Offshore Wind Turbines: Reliability, Availability and Maintenance*, In *IET Power and Energy Series*. London, U.K. : Institution of Engineering and Technology, 2012.

28. Alois Schaffarczyk. *Einführung in die Windenergietechnik*, Herausgegeben von CEwind eG, Carl Hanser Verlag, München, 2012.

29. Siegfried Heier. *Nutzung der Windenergie*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012.

30. Marius Boewe, Matthias Meckert (Hrsg.). *Leitfaden Windenergie. Planung, Finanzierung und Realisierung von Onshore-Windenergieanlagen*, Boorberg, R. Verlag, Stuttgart, 2013.

31. Wind Energy Market Trends. Factors Affecting the Growth of Wind Technologies. Congressional Digest. Feb 2013, Vol. 92 Issue 2, p8-11. 4p.
32. Chamorro, Leonardo P., Porté-Agel, Fernando. Turbulent Flow Inside and Above A Wind Farm: A Wind-Tunnel Study. *Energies* (19961073). Nov2011, Vol. 4 Issue 11, p1916-1936. 21p.
33. WWEA – “World Wind Energy Report 2012”, May 2013.
34. International Energy Agency – IEA, Technology Roadmap, Wind Energy, 2013.
35. International Energy Agency – IEA WIND, 2012 Annual Report, July 2013.
36. Белей В.Ф., Агафонов И.В. Анализ эксплуатационных режимов ветроустановки ВЭУ-600 // Развитие теории и технологии при технической модернизации производств: Сб. докл. Междунар. науч. конф. – г. Ольштын (Польша), 2000.– С. 24-28
37. Белей В.Ф. Анализ режимов работы ветроустановки с АГ// Российские технологии для индустрии: Сб. докл. 5 междунар. сем. 28-30 мая 2001 г. – С.-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2001. – С. 166-167.
38. Белей В.Ф. Научные основы работы ветропарков в составе электроэнергетической системы // Известия КГТУ. – 2003. - № 3. - С. 38 -46.
39. Белей В.Ф. Выбор ветроустановок на основе опыта эксплуатации ветропарка в Калининградской области//М.-Электрика.–2003. № 2.- С. 3 -7.
40. Beley V.F. The introduction of green energy: technical and ecological problems of wind power (EU Tempus Forsee project, 2005 p. 124-127).
41. Белей В.Ф. Ветроэнергетические установки: тенденции развития, проблемы подключения и эксплуатации в составе

электроэнергетических систем // М.- Малая энергетика.- 2005.- № 1-2. – С 6.

42. Белей В.Ф. Современная ветроэнергетика: тенденции развития, проблемы и некоторые пути их решения / Белей В.Ф., Никишин А. Ю. // Москва, Наука и технологии, "Электрика" – 2006.- № 8. – С.19-22.

43. Белей В.Ф. Современное состояние и мировые проблемы развития ветроэнергетики // Москва, "Энергопрогресс"- Энергетик.- 2007. №12. –7с.

44. Белей В.Ф. Перспективы соединения системообразующих сетей Польши, Калининградской области и Литвы между собой и оценка возможностей подключения к ним потенциальных ветропарков//Международная конференция «Комплексное управление, индикаторы развития, пространственное планирование и мониторинг прибрежных районов юго-восточной Балтики» (г. Калининград, 26-30 марта 2008 г.): Избр. тр. «Ученые записки Русского Географического общества» (Калининградское отделение), Т. 1, ч. 1 (спец. выпуск), 2008, N1-N7

45. Белей В.Ф. Современная ветроэнергетика: тенденции развития, проблемы и варианты их решения /В.Ф. Белей, Э. Харцфельд, Я. Пихоцки / Промышленная энергетика. - 2014 .– № 8.- С. 56-61.

46. Белей В.Ф., Никишин А.Ю.Ветроэнергетика России: анализ научно-технических и правовых проблем // Москва - Электричество.- 2011.№7 –С 7-14.

47. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учебное пособие/А.А.Бурмистров, В. И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина и др.; под. ред. В.И. Виссарионова.- М.:Издательский дом МЭИ, 2009.-144с; ил.

9.4 Тема лекции 4: Технологии использования водной энергии

БЕЛЕЙ В.Ф., СЕЛИН В.В.

9.4.1 Введение в лекцию

Тема знакомит с оценкой потенциала водной энергии в мире, основными типами гидроэнергетических установок, методом расчета их мощности. Даны основные схемы использования водной энергии. Изложены экологические аспекты влияния гидроэнергетических установок на застроенную окружающую среду.

9.4.2 Цель и основные результаты обучения

Целью обучения по этой теме является изучение технологий использования водной энергии. Результатом обучения является получение сведений: о возможностях использования водной энергии; экологичности технологий использования водной энергии для процесса существования застроенной окружающей среды.

Предполагаемые основные результаты обучения соответствуют выше предусмотренным целям.

9.4.3 Конспект лекции и раздаточные материалы

Все материалы, и программное обеспечение лучших университетов мира с открытым кодом вы можете найти по ссылке: (http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU). Материал лекции включает в себя следующие разделы:

1. Существующие технологии использования водной энергии и оценка их потенциала.
2. Типы гидроэнергетических установок.
3. Использование энергии приливов.
4. Использование энергии волн.

5. Оценка экологичности технологий использования водной энергии для процесса существования застроенной окружающей среды.

Каждый раздел состоит из различных материалов и программного обеспечения с открытым кодом.

9.4.3.1 Существующие технологии использования водной энергии и оценка их потенциала

К технологиям, использующих водную энергию, относят область энергетики, использующую энергию падающей воды (гидроэнергетика). Эта энергия преобразуется в механическую или, чаще всего в электрическую. Помимо гидроэнергетики водными источниками энергии являются волны и приливы.

Далее рассмотрим положения, относящиеся к основам гидроэнергетики, и приведем данные о потенциале гидроэнергетических ресурсов. Особенности использования энергии приливов и волн изложены соответственно в разделах 9.4.3.3 и 9.4.3.4.

Основой гидроэнергетических и водохозяйственных расчетов являются в первую очередь данные о режиме стока, определяемом соответствующими характеристиками.

Расход воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$) – это количество воды, протекающее в 1 с через поперечное сечение водотока S . Из курса гидравлики известно, что средняя скорость v ($\text{м}/\text{с}$) движения потока воды определяется по выражению.

$$Q = S \cdot v \quad (9.4.3.1)$$

Если поперечное сечение водного потока по длине меняется, то при неизменном расходе и на основе закона сохранения материи выражение 9.4.3.1 преобразуется к виду 9.4.3.2 (уравнение неразрывности потока).

$$Q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \dots = S_n \cdot v_n \quad (9.4.3.2)$$

Сток $Q_s(\text{м}^3)$ – это суммарный объем воды, прошедший через заданное поперечное сечение водовода от начального момента t_0 до некоторого конечного момента времени t_k .

$$Q_s = \int_{t_0}^{t_k} Q(t) dt \quad (9.4.3.3)$$

Мощность и энергия водного потока

Текущий в русле реки или канале водный поток совершает работу, которая расходуется на преодоление внутреннего сопротивления движению водного потока, сопротивления на трение в русле и различные эрозионные воздействия.

Выкладки по определению величины этой работы приводим ниже.

Рассмотрим участок водотока АВ длиной L (рисунок 9.4.3.1). При заданном поперечном сечении водотока $S = \text{const}$ объем воды на этом участке составит величину $L \cdot S$, а ее масса $m = \rho \cdot L \cdot S$, где ρ – плотность воды.

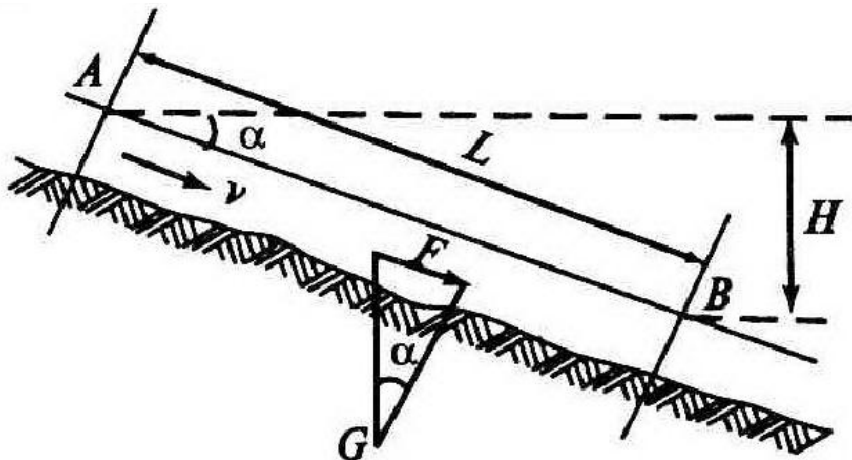


Рисунок 9.4.3.1. Участок водотока

Работа, совершаемая силой влечения воды $F = m \cdot g \cdot \sin \alpha$, будет определяться по выражению.

$$A = F \cdot L = m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha = g \cdot L \cdot \rho \cdot S \cdot \sin \alpha, \quad (9.4.3.4)$$

где g - ускорение свободного падения.

Длину участка L можно выразить как произведение скорости на время, тогда выражение 9.4.3.4 преобразуется к виду

$$A = g \cdot v \cdot t \cdot \rho \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (9.4.3.5)$$

Принимая во внимание, что расход воды определяется как $Q = S \cdot v$, а $H = L \cdot \sin \alpha$ - падение реки на участке АВ, и, подставляя эти выражения в 9.4.3.5, получаем

$$A = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H \cdot t \quad (9.4.3.6)$$

Мощность, то есть работа в единицу времени, равна

$$P = A/t = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H \quad (9.4.3.7)$$

С целью выполнения инженерных расчетов в выражение 9.4.3.7 подставляем $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и, выражая расход воды Q в (м^3), а напор H в (м), получим мощность

$$P = A/t = 9,81 \cdot 10^3 \cdot Q \cdot H \text{ (Вт)} \quad (9.4.3.8)$$

Энергия реки, то есть работа в течении времени t , выраженная в $\text{Вт} \cdot \text{с}$ (Дж), определяется по формуле

$$W = \int_0^T P dt \quad (9.4.3.9)$$

Формулы 9.4.3.8 и 9.4.3.9 выражают соответственно потенциальную мощность и энергию водного потока. Реальная (техническая) мощность после преобразования энергии водного потока в электрическую будет меньше за счет потерь в гидротехнических сооружениях, напорных водоводах, подводящих воду из реки к турбинам, в самих турбинах и генераторах гидроэлектростанций (ГЭС), учитываемых коэффициентом полезного действия. Мощность гидроэлектростанции выбирается из расчета полного использования имеющегося водотока реки в данном месте.

Различают валовый, технический и экономический потенциалы водной энергии. Эти категории потенциалов измеряются среднегодовыми значениями: энергии ($W_{\text{ср.год}}$; Вт*Сек или кВт*час) и мощностью ($P_{\text{ср.год}}$; Вт или кВт). Валовый потенциал подсчитывается в предположении, что весь водный сток будет полностью использован при выработке электроэнергии (не будет холостых сбросов воды через плотину и преобразование водной энергии в электрическую осуществляется без потерь) (таблица 9.4.3.1).

Таблица 9.4.3.1. Гидравлический потенциал по континентам и его использование (2012 год)

№ п/п	Континенты	Гидропотенциал $W_{\text{ср.год}}$ (ТВт·час/год)		Выработка электроэнергии $W_{\text{год}}$ (ТВт·час)	Установленная мощность ГЭС, ГВт
		Валовый	Экономический		
1.	Африка	6 150	842	112	25,9
2.	Азия	11 750	4 689	1 390	444,2
3.	Австралия и Океания	1 500	88,7	39,4	13,3
4.	Европа	2 100	843	531	181
5.	Северная Америка	6 150	1 056	681	140
6.	Южная Америка	5 250	1 676	712	140,5
Всего		32 900	9 194,7	3 465,4	944,9

Примечание:

- 1) Общая установленная мощность ГЭС дана без учета малых ГЭС.
- 2) Установленная мощность малых ГЭС в мире составляет 85 ГВт.

Наиболее важной для практического использования гидроэнергетического потенциала является экономический потенциал: та часть гидроэнергетических ресурсов, которая может быть реализована путем выработки электроэнергии на гидротехнических установках, целесообразность строительства которых экономически обоснована (таблица 9.4.3.2).

Таблица 9.4.3.2. Использование гидроэнергетического потенциала ряда стран

Страна	Экономический гидроэнергетический потенциал, ТВт·ч/год	Выработка электроэнергии на ГЭС, ТВт·ч/год	Доля использованного экономического потенциала, %
Китай	1320	92	7
Россия	850	160,1	18,8
США	705	330	46,8
Бразилия	657	165,4	25,2
Норвегия	130	106,5	81,9

9.4.3.2 Типы гидроэнергетических установок

Технологический комплекс, в котором происходит преобразование механической энергии водного потока в электрическую (гидроэлектростанции) и или, наоборот, электрическая энергия превращается в механическую энергию воды (гидроаккумулирующие - ГАЭС) принято называть гидроэнергетическими установками (ГЭУ). Как следует из выражения 9.4.3.8 для преобразования энергии водного потока в электрическую необходимо иметь определенные значения расхода и напора. В естественных условиях концентрированные в определенном месте напоры встречаются очень редко. Обычно равнинные реки имеют уклон свободной поверхности воды 5-10 см/км, а горные 5-10 м/км. Поэтому для того, чтобы напоры, используемые турбинами ГЭС, имели необходимые значения, их приходится создавать искусственно.

9.4.3.2.1 Схемы концентрации напора

Существует две основные схемы концентрации напора гидротехническими сооружениями: плотинная и деривационная.

В плотинной схеме сооружается плотина, перегораживающая русло реки в выбранном створе (рисунок 9.4.3.2).

В результате образуется разность уровней воды в верховой и низовой по течению сторонам плотины. Создавшееся при этом водохранилище с верховой стороны носит название верхнего бьефа, а часть реки с низовой части – нижнего бьефа. Разность уровней верхнего ($z_{в.б.}$) нижнего ($z_{н.б.}$) бьефов создает напор ГЭС ($H_{ГЭС}$). При этом, напор за счет кривой подпора будет несколько меньше того, который возможен при использовании рассматриваемого участка реки 1-11 ($H_{уч}$). Таким образом, величина ΔH представляет собой невосполнимую потерю напора

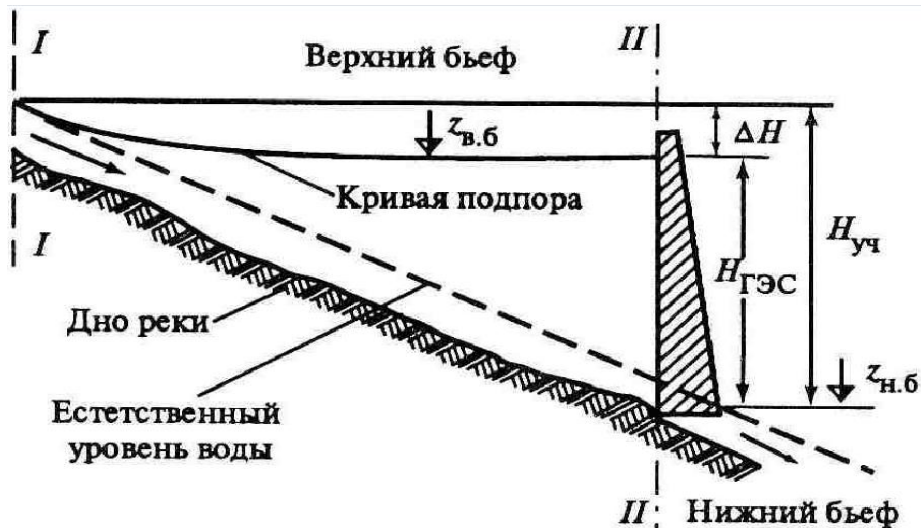


Рисунок 9.4.3.2. Плотинная схема концентрации напора

$$H_{ГЭС} = H_{уч} - \Delta H \quad (9.4.3.10)$$

На горных реках с большими уклонами концентрация напора обычно осуществляется по деривационной схеме. В выбранном створе реки (рисунок 9.4.3.3), возводится плотина 1, создающая небольшой подпор и небольшое водохранилище из которого через водоприемник 2 вода направляется в деривацию 3, представляющую собой искусственный водовод, выполненный в виде открытого канала, туннеля или трубопровода.

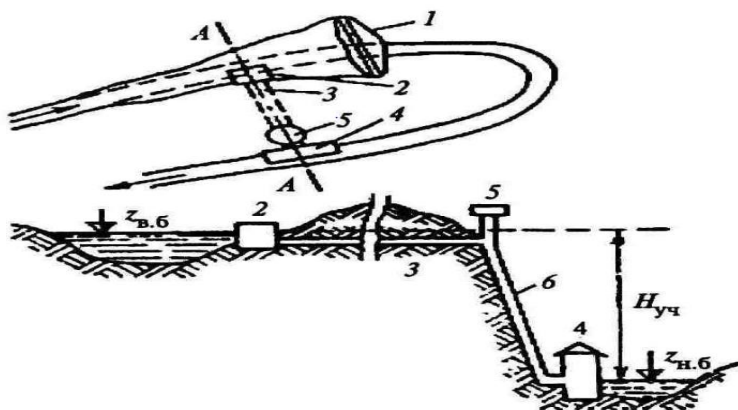


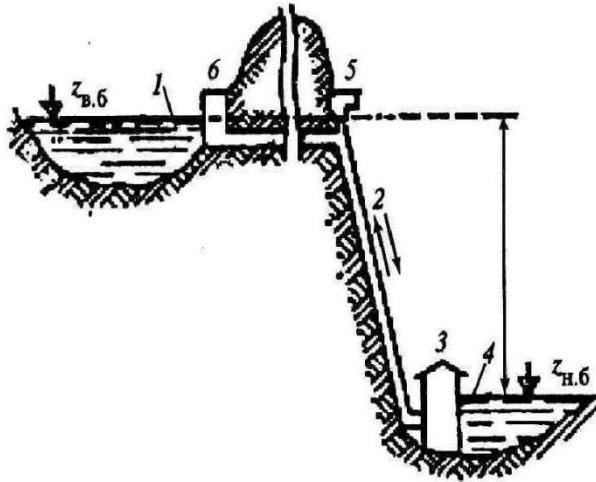
Рисунок 9.4.3.3. Деривационная схема концентрации напора

Из деривации вода поступает по напорным трубопроводам 6 к турбинам 4 ГЭС. Таким образом, в этой схеме напор создается не плотиной (рисунок 9.4.3.3), а деривацией. При этом, если деривация напорная, то для смягчения возможных при нестационарных режимах гидравлических ударах сооружается уравнильный резервуар 5. Напор данной гидроэлектростанции ($H_{ГЭС}$) будет меньше ($H_{вч}$) на размер потерь в водопроводящем тракте.

По иному принципу построена концентрация напора и работа гидроаккумулирующих электростанций. Нижним бассейном (бьефом) такой электростанции могут служить водохранилище или реки, а в качестве верхнего бассейна (бьефа) используется существующее озеро или специально созданное для этих целей на определенной высоте водохранилище 1 (рисунок 9.4.3.4а). Гидроагрегаты, установленные в здании ГАЭС 3 (Рисунок 9.4.3.4а) могут работать в насосном или турбинном режимах. В ночное время, когда нагрузка энергосистема значительно снижается, ГАЭС работает в насосном режиме и потребляет электроэнергию (рисунок 9.4.3.4б) от энергетической системы (рисунок 9.4.3.5). Вода из нижнего

бассейна перекачивается верхний. Таким образом происходит гидравлическое аккумулярование энергии.

а)



б)

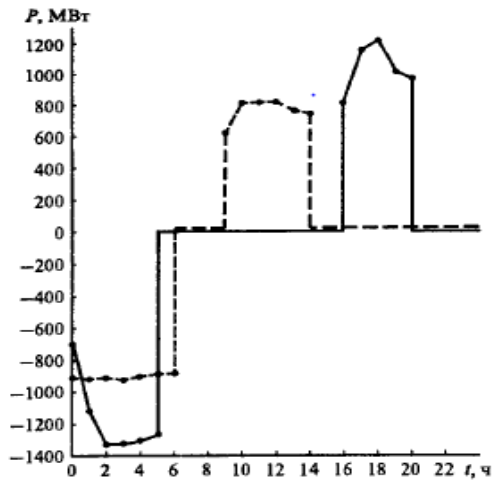


Рисунок 9.4.3.4. Схема ГАЭС (а) и суточные графики ее нагрузки ($P_{\text{ГАЭС}} = 1200 \text{ МВт}$) (б)

Днем, особенно в вечерние часы, когда нагрузка энергосистемы значительно возрастает, вода из верхнего бассейна перекачивается в нижний бассейн, и ГАЭС работает как ГЭС (рисунок 9.4.3.4б).

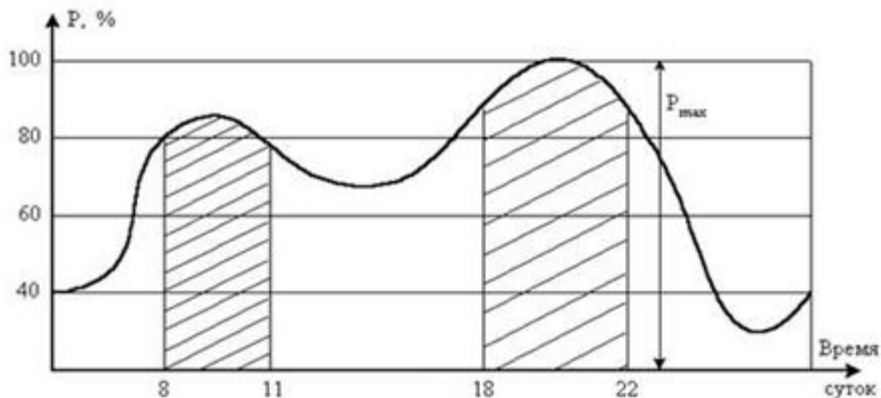


Рисунок 9.4.3.5. Типовой суточный график энергосистемы

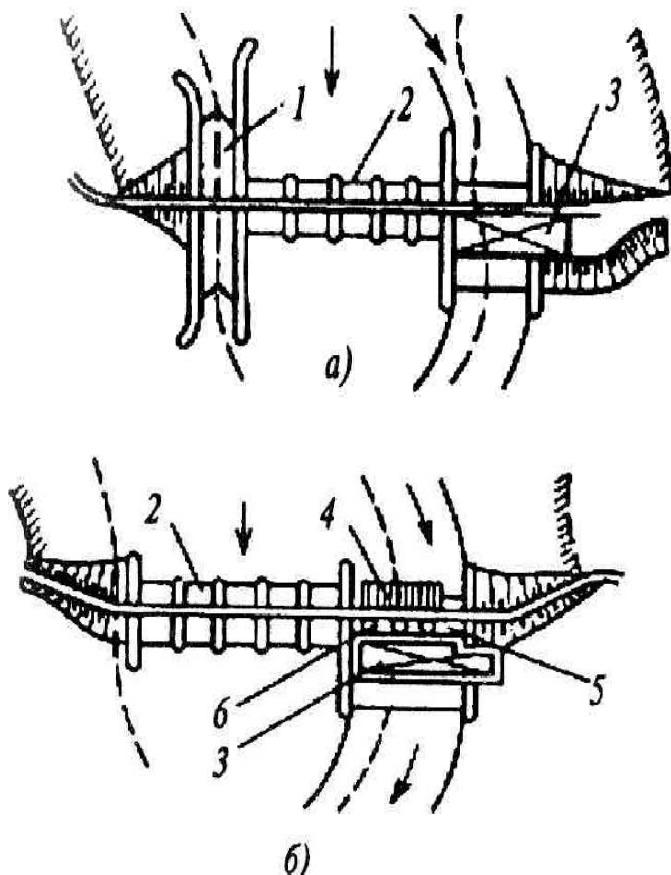
Вследствие потерь ГАЭС отдает в систему около 70-75 % электрической энергии, получаемой ею из системы. Тем не менее, эти станции выгодны, так как они потребляют более дешевую, а иногда и «бросовую» электроэнергию в ночные часы, в период малой нагрузки системы, а отдают более дорогую энергию в часы пиков нагрузки. Заполняя ночные провалы и снимая утренние и вечерние пики электрической нагрузки системы. Кроме того, ГАЭС - это высокоманевренные электростанции и обеспечивают устойчивую и надежную работу энергосистем.

9.4.3.2.2 Гидротехнические сооружения гидроэлектростанций

Состав и компоновка основных сооружений

Состав и компоновка основных сооружений ГЭС определяются схемой концентрации напора. Гидроэлектростанции, сооруженные по плотинной схеме, делятся на два типа: русловые и приплотинные.

Основными сооружениями ГЭС, выполненные по плотинной схеме, являются плотины и здания ГЭС. При напоре до 30 метров здание русловой гидроэлектростанции (рисунок 9.4.3.6а) размещается в одном створе с плотиной и воспринимает напор.



1 - шлюз; 2 - водосливная бетонная плотина; 3 - здание ГЭС; 4 - водоприемник; 5 - глухая бетонная плотина; 6 - турбинные трубопроводы.

Рисунок 9.4.3.6 Схемы ГЭС: русловая (а) и приплотинная (б) с бетонными плотинами.

При напорах более 30 метров здание ГЭС размещается за плотиной (приплотинная ГЭС) в нижнем бьефе и уже не воспринимает напор (рисунок 9.4.3.6б).

В состав гидроузла, кроме плотины и здания ГЭС, включаются сооружения для удовлетворения специфических нужд: шлюз для водного транспорта; рыбоходы и прочее.

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

Головной узел ГЭС с безнапорной деривацией (рисунок 9.4.3.7) состоит из плотины с водосборником и поверхностным водоприемником. Безнапорная деривация выполняется в виде открытого канала. В местах пересечения с долинами, оврагами и реками создаются сооружения для пропускания воды под или над этими препятствиями. У стационарного узла канал заканчивается и переходит в напорный бассейн. Далее вода по турбинным водоводам поступает к гидротурбинам в здании ГЭС. Отводящий канал

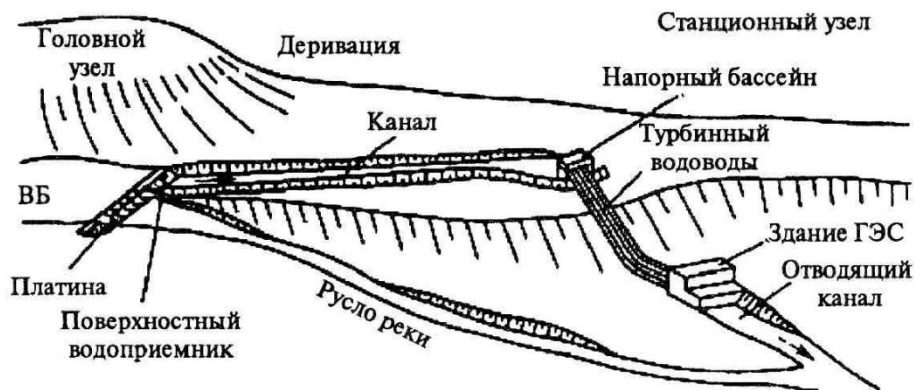


Рисунок 9.4.3.7. Схема сооружения ГЭС с безнапорной деривацией

Если местность сильно пересеченная и для безнапорной деривации нет условий, то деривация выполняется в виде туннеля или трубопровода (рисунок 9.4.3.8).



Рисунок 9.4.3.8. Схема сооружения ГЭС с напорной деривацией

Головной узел включает в качестве основных сооружений плотину с водосбросом и водоприемник. Стационарный узел в отличие от ГЭС с безнапорной деривацией часто имеет уравнивающий резервуар, основное назначение которого – борьба с возможными гидравлическими ударами, возникающих в нестационарных режимах работы ГЭС.

Гидротехническое и энергетическое оборудование зданий гидроэлектростанции

Рассмотрим функционирование гидротехнического и энергетического оборудования ГЭС на примере русловой станции (рисунок 9.4.3.9).

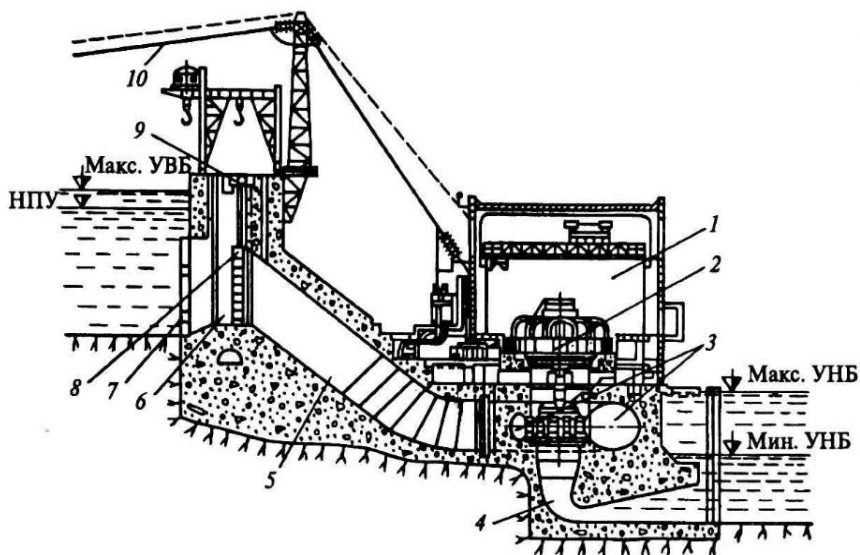


Рисунок 9.4.3.9. Здание русловой гидроэлектростанции

Уровень воды в водохранилище меняется в диапазоне от максимального значения уровня верхнего бьефа УВБ до минимального значения. В зависимости от величины электрической мощности, которую планируется выдать в электрическую сеть, посредством подъемного механизма затвора 9 регулируется объем водного потока, подаваемого через водоприемник 6 и плоский затвор 8 по турбинному трубопроводу через спиральную камеру 3 к гидравлической турбине, на одном валу с которой расположен гидрогенератор 2. В гидравлической турбине энергия движущегося водного потока преобразуется в механическую энергию вращающегося вала. Далее механическая энергия в гидрогенераторе преобразуется в электрическую энергию, которая через линию электропередачи 10 передается в электроэнергетическую систему. От гидравлической турбины через отсасывающую камеру 4 вода поступает в реку.

Каскады гидроэлектростанций и водохранилищ

Несколько ГЭС, последовательно расположенных на одном водотоке, образуют каскад. Проектирование и осуществление каскадов ГЭС имеет целью возможно более полное использование падения реки и ее стока в интересах всего народного хозяйства.

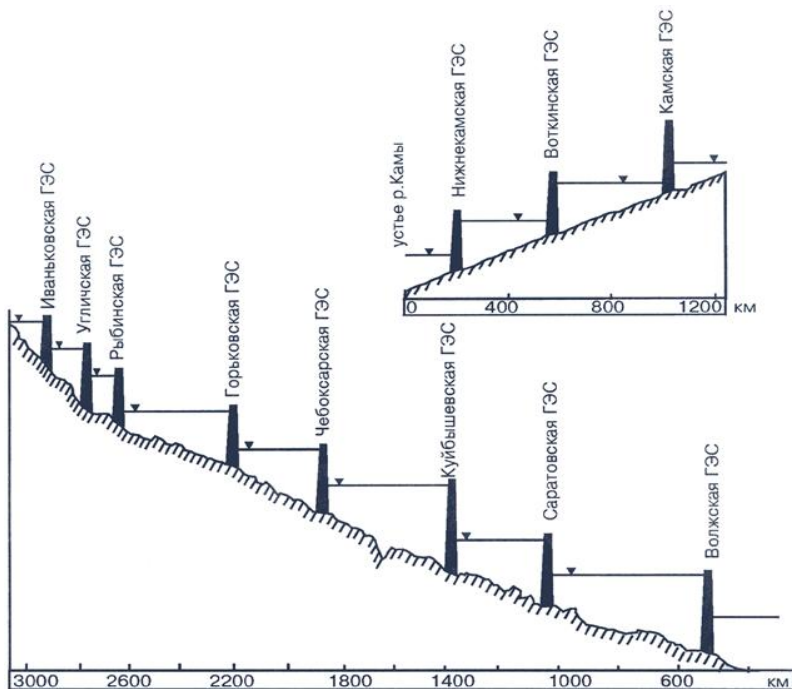


Рисунок 9.4.3.10. Продольный профиль каскада ГЭС и водохранилищ

Представляет интерес оценить тенико-экономические показатели самой крупной в мире гидроэлектростанции - Три ущелья (рисунок 9.4.3.11). Строительство началось в 1992 году, завершение строительства и ввод в эксплуатацию состоялся 4 июля 2012 года. Общий объем инвестиций в проект ГЭС составил \$26 млрд., из которых \$10 млрд. строительство, столько же составили расходы на переселение и около \$6 млрд. проценты с кредитов.

Характеристики ГЭС: бетонная плотина длиной 2309 м и высотой 185 м; проектная мощность 22,5 ГВт; уровень проектной годовой выработки 100 млрд кВт·час; напорные сооружения ГЭС образуют крупное водохранилище площадью 1 045 км² с полезной ёмкостью 22 км³; максимально допустимая высота верхнего бьефа над уровнем моря (НПУ) равна 175 м; высота нижнего бьефа над уровнем моря составляет 66 м. Таким образом, напорный уровень в течение года изменяется от 79 м до 109 м, При создании водохранилища было затоплено 27820 га обрабатываемых земель, под воду ушли два города.



Источник:<http://grandstroy.blogspot.ru/2013/04/three-gorges-dam.html>

Рисунок 9.4.3.11. Самая мощная гидроэлектростанция в мире – Три ущелья (Китай)

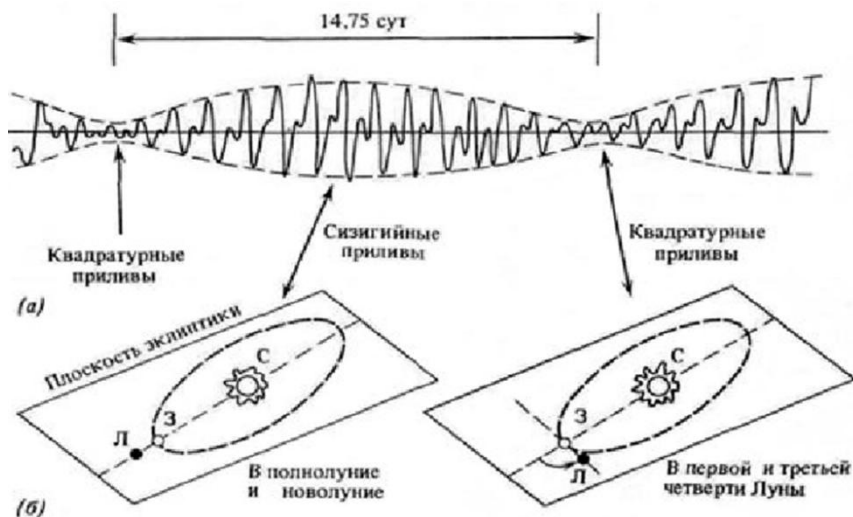
9.4.3.3 Использование энергии приливов

Приливная электростанция (ПЭС) это особый вид гидроэлектростанции, использующей энергию приливов.

Жидкость в океанах на поверхности вращающейся Земли удерживается силами гравитации. Расстояние от Земли до Луны и от

Земли до Солнца поддерживаются за счет равенства гравитационного взаимодействия и взаимодействия центробежных сил в соответствии с законом всемирного тяготения (рисунок 9.4.3.12).

Твердые породы Земли, испытывая изменения этих сил при вращении Земли, Луны и Солнца подвергаются лишь небольшим деформациям (растягивающие и сжимающие усилия компенсируются за счет внутренних напряжений). В жидкости же подобные напряжения не возникают, и она переходит в движение относительно земной поверхности. Это и является причиной приливов и отливов.



Источник: <http://www.oceanavt.ru/volny-i-volnovye-dvizheniya/1311-ochen-dlinnye-volny-tsunami-i-prilivy.html>

Рисунок 9.4.3.12 Характер приливов и отливов (а), явление сизигийного (высокого) и квадратурного (низкого) приливов (б). Л - Луна, З - Земля, С - Солнце.

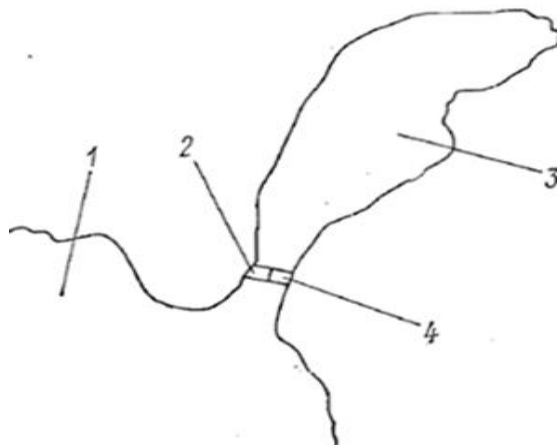
Таким образом, прилив и отлив — это периодические вертикальные колебания уровня океана или моря, являющиеся результатом изменения положений Луны и Солнца относительно

Земли, эффекта вращения Земли и особенностями рельефа местности, проявляющиеся в периодическом горизонтальном смещении водных масс. Приливы и отливы вызывают изменения в высоте уровня моря, а также периодические течения, известные как приливные течения. Приливы обычно происходят два раза в сутки, чередование максимума и минимума приливов происходит через 6 часов 12 минут. Продолжительность полного цикла составляет 29,53 суток. Когда Земля располагается между Луной и Солнцем и Луна находится в сизигии (соединении), возникают сизигийные приливы. Когда же Солнце и Луна находятся в поперечном расположении относительно Земли (рисунок 9.4.3.12б) - квадратурный прилив.

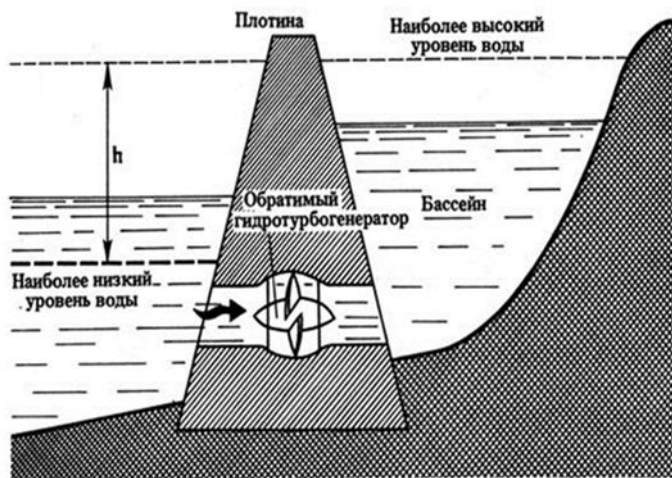
Наибольшая величина прилива, то есть разность максимального уровня при приливе и минимального уровня при отливе в открытом океане составляет примерно 2 м и значительно увеличивается у побережья, в проливах и узких заливах. Самые высокие приливы в мире имеют место в бухте Фанди (15,6—18 м), которая находится на восточном побережье Канады между Нью-Брансуиком и Новой Шотландией.

Принцип работы приливной электростанции заключается в следующем. В заливе строится плотина, отделяющая часть его от океана (рисунок 9.4.3.13)

а)



б)



Источник: <http://alternativenenergy.ru/energiya/553-prilivnaya-elektrostantsiya-princip-foto.html>

Рисунок 9.4.3.13 Упрощенная схема приливной электростанции (1 - океан, 2 - плотина, 3 - залив)

Во время прилива и отлива по разные стороны плотины образуется перепад уровней воды, вода устремляется через плотину

в сторону нижнего уровня и приводит в движение реверсивные турбины (гидравлическая турбина и гидрогенератор), вращающиеся то в одну (во время прилива), то в другую (во время отлива) сторону. При этом энергия водного потока преобразуется в электрическую и выдается в энергосистему (раздел 9.4.3.2). По сравнению с обычной ГЭС приливная электростанция имеет ряд преимуществ: экологичность, низкая себестоимость производства энергии. Недостатками являются: высокая стоимость строительства и изменяющаяся в течение суток мощность, из-за чего ПЭС может работать только в составе энергосистемы, располагающей достаточной мощностью электростанций других типов.

В настоящее время построены и функционируют приливные электростанции в ряде стран: во Франции (Ля Ранс мощностью 240 МВт) (рисунок 9.4.3.14), в Южной Корее (мощностью 254 МВт).



Источник: <http://wikimapia.org/>

Рисунок 9.4.3.14 Приливная электростанция «Ля Ранс» Франция

В России самые высокие приливы случаются в Пенжинской губе Охотского моря до 12,9 м. Это точка самых высоких приливов на всём Тихом океане. Разработан проект Пенжинской ПЭС, которая

могла бы стать самой мощной электростанцией в мире: проектная мощность 135 ГВт.

9 4.3.4 Использование энергии волн

Значительное количество полезной энергии можно в перспективе получать, используя энергию морских волн. По оценкам специалистов валовый потенциал энергии морских волн составляет около 70 000 ГВт, что на порядок выше установленной мощности всех электростанций в мире.

Наибольший интерес представляют длиннопериодные ($\tau \approx 10$ сек) волны большой амплитуды ($a \approx 2$ м), позволяющие снимать с единицы гребня в среднем от 50 до 70 кВт/м (рисунок 9.4.3.15). Это наиболее общий тип волн, существующий при условии, что средняя глубина моря превышает половину длины волны.

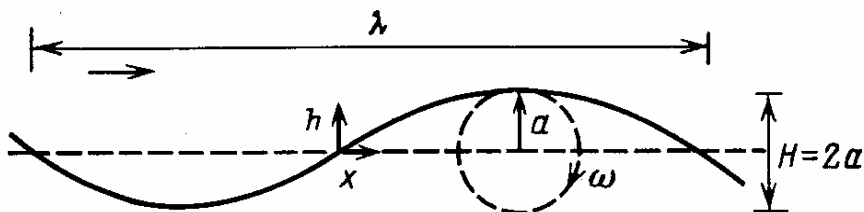


Рисунок 9.4.3.15. Характеристики волны.

Полная энергия на единицу площади поверхности волны равна сумме кинетической (W_K) и потенциальной (W_{II}) энергий

$$W = W_K + W_{II} \quad (9.4.3.11)$$

Мощность, переносимая волнами

$$P = \frac{\rho * g^2 * a^2 * T}{2\pi}, \quad (9.4.3.12)$$

где период движения воды

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \sqrt{\frac{2\pi * \lambda}{g}} \quad (9.4.3.13)$$

Следовательно, мощность, переносимая волнами, увеличивается прямо пропорционально квадрату амплитуды и периоду. Именно поэтому для специалистов по океанской энергетике особенно привлекательны длиннопериодные волны, обладающие значительной амплитудой.

На практике волны оказываются совсем не такими идеализированно-синусоидальными, как это рассматривалось выше. Обычно в море наблюдаются нерегулярные волны с переменными частотой, направлением и амплитудой. Поскольку результирующее волнение, действующих в одном направлении, то мощность, извлекаемая преобразователями направленного действия, будет значительно ниже той, которую переносят волны.

Начиная с 1799 по настоящее время ведутся исследования и работы по использованию энергии волн.

1799 год. Первая заявка на патент волновой мельницы (Франция).

1880 — 1900 годы. Многочисленные попытки использовать энергию волн для получения электричества.

1973 год. Увеличение интереса к волновой энергии после нефтяного кризиса.

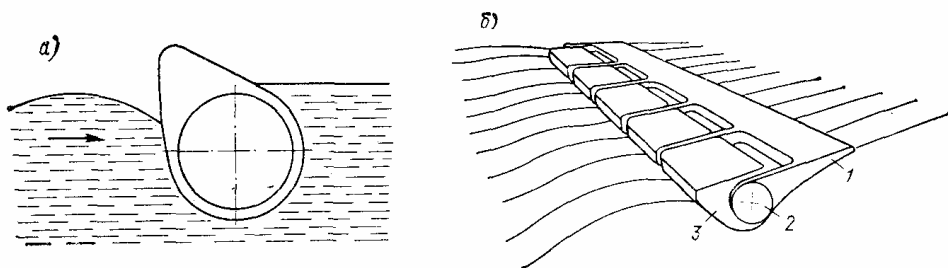
2008 год. Первая волновая электростанция вошла в коммерческую эксплуатацию у берегов Португалии.

Волновые гидроустановки.

В настоящее время ведутся разработки различных классов преобразователей. Рассмотрим преобразователи, отслеживающие профиль волны.

В этом классе преобразователей остановимся в первую очередь на разработке Эдинбургского университета «утка Солтера».

Техническое название такого преобразователя – колеблющееся крыло. Форма преобразователя обеспечивает максимальное получение мощности (рисунок 9.4.3.16).



а – схема преобразования энергии волны; б – вариант конструкции преобразователя; 1 – плавучая платформа; 2 – цилиндрическая опора с размещенными в ней приводами и электрогенераторами; 3 – асимметричный поплавок.

Рисунок 9.4.3.16. «Утка Солтера»

Волны, поступающие слева, заставляют Утку колебаться. Цилиндрическая форма противоположной поверхности обеспечивает отсутствие распространения волны направо при колебаниях утки вокруг оси. Энергия передается 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. Нить из Уток протяженностью несколько километров предполагается установить в районе с наиболее интенсивным

волнением западнее Гебридских островов. Планируемая мощность электростанции примерно 100 МВт.

Первая волновая электростанция.

Идея этой волновой электростанции принадлежит шотландским специалистам из основанной в январе 1998 года в Эдинбурге фирмы «Океанское энергоснабжение» (Ocean Power Delivery — OPD). Волновая электростанция расположена в районе Агусадора, Португалия, на расстоянии 5 километров от берега. Открыта 23 сентября 2008 года. Мощность электростанции 2,25 МВт. Основу станции составляют конвертеры (Pelamis P-750). Каждый из них размером с небольшой железнодорожный состав: 120 метров длиной; 3,5 метра в диаметре и массой 750 тонн.



Источник: <http://www.membrana.ru/particle/2933> (фото с сайта hydro.com).

Рисунок 9.4.3.17 Полномасштабный опытный образец PelamisP-750 в действии.

Конвектор это полузатопленная структура, состоящая из четырёх цилиндрических секций, связанных шарнирными соединениями. Волны заставляют изгибаться эту конструкцию. Внутри, в местах соединения соседних секций, перемещаются

гидравлические поршни, прокачивающие масло через гидравлические двигатели, которые вращают генераторы. Электрическая энергия от электростанции посредством морского кабеля передается на береговую подстанции энергетической системы.

9.4.3.5 Оценка экологичности технологий использования водной энергии для процесса существования застроенной окружающей среды

Гидроэнергетические объекты оказывают существенное влияние на окружающую природную среду. Это влияние является локальным. При рассмотрении влияния гидроэнергетических объектов на окружающую среду необходимо различать период строительства гидроэнергетических объектов и период их эксплуатации.

Первый период сравнительно кратковременный – несколько лет. В это время в районе строительства нарушается естественный ландшафт. В связи с прокладкой дорог, постройкой промышленной базы и поселка резко повышается уровень шума. Вода, используемая для разнообразных строительных работ, возвращается в реку с механическими примесями: частицами песка, глины и так прочее. Возможно загрязнение воды коммунально-бытовыми стоками строительного поселка. Подъем уровня воды в верхнем бьефе начинается обычно в период строительства. В результате производимого при этом наполнения водохранилища изменяются расходы и уровни воды в нижнем бьефе.

Влияние водохранилища на окружающую среду зависит от географического положения и типа водохранилища (горное, предгорное, равнинное), от геологического строения и гидрогеологической характеристики его ложа и бортов, от площади,

конфигурации и объема водохранилища, глубины, режима эксплуатации и другое.

В период эксплуатации происходит разностороннее влияние гидроэнергетических объектов на окружающую среду. Наиболее существенное влияние на природу оказывают водохранилища. Создание водохранилищ необходимо для энергетического использования водотока, для водного транспорта, для обеспечения водой промышленности, сельского хозяйства и населения. Водохранилища комплексного назначения позволяют удовлетворить потребности нескольких отраслей народного хозяйства. Положительное народно-хозяйственное значение водохранилищ весьма велико. Но сооружения их имеют и отрицательные последствия. Необходимо способствовать повышению положительных свойств и уменьшению отрицательных последствий сооружения. Рассмотрим некоторые основные результаты использования водной энергии.

А. Зона водохранилища

1. Затопление в верхнем бьефе. Создание водохранилища влечет за собой затопление территории. В зону затопления могут попасть сельскохозяйственные угодья, месторождения полезных ископаемых, промышленные и гражданские сооружения, памятники старины, дорог, лесные массивы, места традиционного обитания животных и растений.

2. Подтопление. Подтопление прилежащих к водохранилищу земель происходит вследствие подъема уровня грунтовых вод. В зоне избыточного увлажнения подтопление влечет за собой негативные последствия – переувлажнение корней растений и их отмирание.

3. Переработка берегов. Вследствие подъема и снижения уровней воды в водохранилище при регулировании стока и волновых

явлений происходит переформирование (переработка) берегов водохранилища.

4. Качество воды. Вследствие снижения скорости течения и уменьшения перемешивания воды по глубине существенно изменяются физико-химические характеристики воды в водохранилище по сравнению с бытовыми условиями реки до создания водохранилища.

5. Влияние водохранилищ на микроклимат. Водоохранилища повышают влажность воздуха, изменяют ветровой режим прибрежной зоны, а также температурный и ледовой режим водотока.

6. Влияние водохранилищ на фауну. Многие животные из зоны затопления вынуждены мигрировать на территорию с более высокими отметками. При этом видовой состав и численность животных обычно уменьшается. В ряде случаев водохранилища способствуют обогащению фауны новыми видами водоплавающих птиц и в особенности рыб: карасевых, сазана, щуки.

В. Нижний бьеф

Водоохранилища регулируют расход воды в течение года, а большие водохранилища могут выравнять расход в течение нескольких лет. Весной расходы и уровни воды в нижнем бьефе уменьшаются, а в период летней и зимней межени повышаются по сравнению с бытовыми условиями реки до создания водохранилища. Вода, поступающая из водохранилища в нижний бьеф, оказывается зимой теплее, а летом холоднее, чем в естественных условиях.

Снижение расходов и уровней воды в половодье может повлечь за собой осухождение поймы и потребовать замены сенокосных угодий зерновыми и пропашными культурами. Понижение расходов воды и уровней весной, уменьшение длительности половодья и снижение температуры воды приводит к более позднему началу и

уменьшению общей продолжительности весеннего нереста рыб. Уменьшение расходов воды в паводок и половодье в соответствующих случаях предотвращают наводнения.

С. Приливные электростанции.

Практика эксплуатации подтвердила экологическую безопасность приливных электростанций:

- плотины ПЭС биологически проницаемы: пропуск рыбы через ПЭС происходит практически беспрепятственно, основная кормовая база рыбного стада — планктон: на ПЭС гибнет 5–10 % планктона, а на ГЭС 83–99 %;

- снижение солености воды в бассейне ПЭС, определяющее экологическое состояние морской фауны и льда, составляет 0,05–0,07 %;

- смягчение климатических условий на примыкающих к бассейну ПЭС территориях;

- защита берегов от штормовых явлений;

- расширение возможностей хозяйств марикультуры в связи с увеличением почти вдвое биомассы морепродуктов;

- исключительные возможности расширения туризма.

9.4.4 Практические вопросы и решения

1. Объяснить понятия валового и экономического потенциалов водной энергии и их основные показатели.

2. Используя данные приведенные в таблице 9.4.1 (Гидровлический потенциал по континентам и его использование) рассчитать долю использования экономического потенциала по различным континентам.

3. Рассчитать мощность гидроэлектростанции при заданных значениях отметок уровней верхнего и нижнего бьефов и расходе воды.

4. Назовите и поясните особенности основных схемы использования водной энергии для гидроэлектростанций.

5. Поясните достоинства гидроэлектростанций и гидроаккумулирующих электростанций.

6. Поясните с использованием рисунка 9.4.3 принцип работы приливной электростанции.

7. Поясните экологические аспекты, обусловленные возведением гидроэлектростанций.

8. Как повлияет на качество вашей жизни, если в Вашей области будет возведена гидроэлектростанция.

9. Поясните экологические особенности при эксплуатации приливных электростанций.

10. Какие параметры определяют мощность, переносимую волной?

11. Как можно повысить эффективность застроенной окружающей среды за счет использования водной энергии?

Студент может также найти вопросы самоконтроля по и задачи, которые можно решить по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU.

9.4.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)

1. Wagner, Hermann-Josef. Introduction to hydro energy systems, 2011

2. Bansal Ramesh C., Zobaa Ahmed F. Handbook of Renewable Energy Technology, 2011

3. Ion Bostan, Adrian Gheorghe, Valeriu Dulgheru, Ion Sobor, Viorel Bostan, Anatolie Sochirean. Resilient Energy Systems. Renewables: Wind, Solar, Hydro, 2013

4. Cleveland Cutler J. Handbook of Energy. Volume I: Diagrams, Charts, and Tables, 2012
5. Tim Jackson. Renewable Energy. Prospects for Implementation, 1993
6. Ali Sayigh. Comprehensive Renewable Energy. Volume 6: Hydro Power, 2012
7. N. El Bassam, P. Maegaard, Marcia Lawton Schlichting. Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities. Strategies and Technologies toward Achieving Sustainability in Energy Generation and Supply, 2013
8. Mrinmoy Majumder, Soumya Ghosh. Decision Making Algorithms for Hydro-Power Plant Location, 2013
9. K. Heinloth. Renewable Energy, 2006
10. Changkuan Zhang, Hongwu Tang. Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, 2009
11. T. J. Gray, O. K. Gashus. Tidal Power, 1972
12. Edward Kuiper. Water Resources Development. Planning, Engineering and Economics, 1965
13. Finn R. Forsund. Hydropower Economics, 2007
14. David V. Evans. Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization, 1986
15. Roger H. Charlier, Charles W. Finkl. Ocean Energy. Tide and Tidal Power, 2009
16. Елистратов В.В. Возобновляемые источники энергии. Изд. 2-е доп.- Спб.: Наука, 2013.- 308С.
17. Гидроэнергетические установки (гидроэлектростанции, насосные станции и гидроаккумулирующие электростанции)/под ред. Д.С. Щавелева.- Л.:Энергоиздат.-1984.-С.520.
18. Проектирование схем электроустановок // Балаков Ю.А., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. - М.: Издательство МЭИ, 2004 - 288с.

9.5 Тема лекции 5: Технологии использования биоэнергетических ресурсов

СЕЛИН В.В.

9.5.1 Введение в лекцию

Тема знакомит с физическими основами фотосинтеза, в результате которого происходит накопление биомассы в условиях Земли. Рассматриваются процессы производства биотоплива, его валовой, технический и экономический потенциал. Проводится анализ вариантов утилизации биомассы «сельского» и «городского» происхождения с целью получения тепловой и электрической энергии, а также побочных коммерческих продуктов. Приводятся примеры действующих биоэнергетических комплексов и установок. Рассматриваются экономические и экологические аспекты биоэнергетики.

9.5.2 Цель и основные результаты обучения

Целью обучения является изучение технологий использования биомассы «сельского» и «городского» происхождения для замещения традиционных невозобновляемых энергоресурсов в энергобалансах отдельных стран и (или) регионов. Основными результатами обучения могут быть:

- сведения о характеристиках различных видов биотоплива;
- информация о приоритетных видах биомассы для использования в региональных энергобалансах;
- овладение методами расчёта биоэнергетических установок и их технико-экономической эффективности;
- знакомство с принципами расчёта биогазогенераторов и тепловых схем биоэнергетических установок;
- знакомство с динамикой внедрения биоэнергетики в энергобалансы различных стран.

9.5.3 Конспект лекции и раздаточные материалы

Все материалы и программное обеспечение лучших университетов мира с открытым кодом вы можете найти по ссылке: (http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU). Материал лекции включает в себя следующие разделы:

1. Фотосинтез.
2. Биомасса.
3. Классификация процессов производства биотоплива.
4. Газификация.
5. Анаэробное сбраживание.
6. Производство биотоплива для энергетических целей.
7. Технологии обезвреживания и утилизации твёрдых бытовых и промышленных отходов.
8. Состояние и перспективы развития биоэнергетики в России и за рубежом.

Каждый раздел включает в себя различные наглядные пособия, раздаточный материал и программное обеспечение с открытым кодом.

9.5.3.1 Фотосинтез

Биоэнергетика – это использование энергоресурсов биомассы для производства товарного топлива и энергии, а также сохранение баланса диоксида углерода в биосфере и атмосфере как одного из составляющих парниковых газов.

Биомасса – это то, из чего состоят растения и животные. Основа биомассы – органические соединения углерода, которые в процессе соединения с кислородом при сгорании или в результате естественного метаболизма выделяют тепло.

Образование органических веществ и аккумуляирование ими химической энергии происходит под воздействием солнечного излучения. Этот процесс носит название фотосинтеза и сопровождается выделением кислорода, на потреблении которого основана наша жизнедеятельность. Поток фотосинтетической энергии на нашу планету составляет $0,9 \cdot 10^8$ МВт (250 кВт на человека). Энергосодержание ежегодно накапливаемой за счёт фотосинтеза биомассы (220 млрд. т по сухому веществу) равно $4 \cdot 10^9$ ТДж, что в 10 раз превышает потребление топлива и энергии современным мировым сообществом ($4 \cdot 10^8$ ТДж).

Поток фотосинтетической энергии определённым образом связан с двумя доминирующими процессами: обеспечением температурных условий для протекания химических реакций и фотовозбуждением электронов для получения кислорода из воды и «строительного материала» (биомассы) из углерода. В соответствии с первым законом термодинамики имеем:

$$E_{\text{ф}} \Rightarrow E_{\text{э}} + L \Rightarrow E_{\text{ов}}, \quad (9.5.3.1)$$

где $E_{\text{ф}}$ – энергия фотонов, $E_{\text{э}}$ – энергия возбуждённого состояния электронов, L – работа перегруппировки электронных состояний в результате электромагнитных процессов, $E_{\text{ов}}$ – химическая энергия органических веществ.

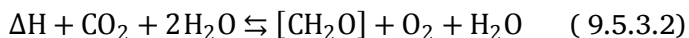
В результате фотосинтеза образуются в основном углеводы, состоящие из углерода в окислено-восстановленном состоянии (например, глюкоза $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), а также белки и жиры.

В зелёных растениях, включая водоросли, происходит фиксация атмосферного углерода из CO_2 в результате нескольких реакций:

- световых, в которых фотоны продуцируют O_2 из H_2O и в две стадии возбуждают электроны для образования сильно восстановленных химических соединений;

- темновых (не требующих света), в которых ранее образованные химические соединения восстанавливают CO_2 до углеводов, белков и жиров.

Энергия, полученная от солнечного излучения в процессе фотосинтеза, может быть определена при сжигании конечных продуктов:



Здесь $\Delta H = 470$ Дж/моль – теплота (изменение энтальпии), полученная в процессе сгорания, равная энергии фотосинтеза E_{ϕ} .

Усвоение CO_2 листьями растений зависит от многих факторов, особенно от температуры, концентрации CO_2 , интенсивности и спектрального состава света. Эффективность (КПД) фотосинтеза определяется отношением полной энтальпии H , полученной с единицы площади биомассы F к начальной величине солнечной энергии E , приходящейся на ту же единицу площади в течение специфического для каждого растения периода роста (от нескольких лет до минут):

$$\eta = \frac{HF}{EF} \quad (9.5.3.3)$$

Для различных условий эта величина изменяется в широких пределах от 0,1% до 30%.

Сбрасывающие листву здоровые зелёные растения на солнечном свету производят в час примерно 3 л. кислорода на 1 кг сырой массы листьев, что соответствует потоку мощности 16 Вт и достигается при облучаемой поверхности листьев 1 м^2 . Процессы метаболизма (обмена веществ в организме человека) соответствуют мощности 100 Вт при отдыхе и 200 Вт во время работы. Т.о. одному человеку для жизни необходимо $15 - 30 \text{ м}^2$ поверхности листьев.

9.5.3.2 Биомасса

Посредством химических или биохимических процессов биомасса может быть трансформирована в такие виды искусственного топлива как газообразный метан с низшей теплотворной способностью $Q_n^P = 55$ МДж/кг, жидкий метанол ($Q_n^P = 40$ МДж/кг), твёрдый древесный уголь ($Q_n^P = 30$ МДж/кг).

Система планетарного кругооборота биомассы показана на рисунке 9.5.3.1. При сгорании энергия биотоплива рассеивается, но продукты сгорания могут вновь преобразовываться в биомассу путём естественных или сельскохозяйственных процессов. Таким образом, использование промышленного биотоплива, будучи хорошо увязанным с природными экологическими циклами, может не давать загрязнений и обеспечивать непрерывный процесс получения энергии. На единице площади суши образуется вдвое больше биомассы, чем на единице поверхности моря. Применение биотоплива в виде дров, навоза, соломы и ботвы растений имеет первостепенное значение в домашнем хозяйстве для - 50% населения планеты. Мощность этого источника составляет - 300 ГВт.

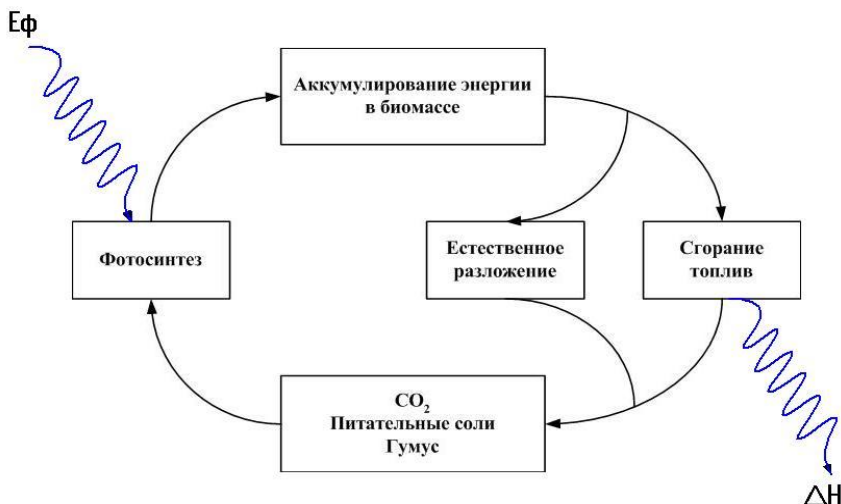


Рисунок 9.5.3.1. Система планетарного кругооборота массы

В соответствии со своей природой биомасса характеризуется содержанием влаги и углерода. Так в момент сбора урожая влажность растительной биомассы составляет 50%, а у водорослей из воды 90%. «Сухой» материал получается после длительного взаимодействия с окружающей средой и характеризуется влажностью 10 – 15 %. Этими показателями определяются основные физико-технические характеристики биомассы, к которым можно отнести влагосодержание, плотность и теплотворную способность.

Если обозначить общую биомассу через m , а сухую (обезвоженную) биомассу через m_0 , то влагосодержание можно определить по сырому основанию как:

$$w = \frac{m - m_0}{m} \quad (9.5.3.4)$$

а по сухому основанию как:

$$w_0 = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (9.5.3.4a)$$

Плотность сухой биомассы в 3-4 раза меньше, чем плотность угля, что удорожает её доставку и переработку.

Энергетической характеристикой биомассы является её низшая теплотворная способность Q_n^P . Она изменяется от 10 МДж/кг для сырой древесины до 20 МДж/кг для сухой биомассы.

Немецкое энергетическое агентство (dena) отмечает следующие отличительные особенности и преимущества биоэнергетики:

- биоэнергию можно накапливать и гибко использовать в самых разных целях. Она доступна в любое время и способна удовлетворять самым разным требованиям. Это относится как к исходным материалам, например древесине, так и к промежуточным или конечным продуктам, например биогазу и биоэтанолу.

- практически в любой стране имеется пригодная к использованию биомасса.

- использование биомассы позволяет уменьшить проблемы, связанные с переработкой коммунальных отходов, и одновременно является источником столь необходимой энергии.

- сельскохозяйственные регионы получают двойную выгоду от использования биоэнергии: сохраняются и создаются рабочие места как в сельском и лесном хозяйстве, так и в процессе преобразования биоэнергии в целом. Кроме того, выращивание культур для биоэнергетики обеспечивает фермерам новую сферу деятельности.

- биоэнергетика позволяет децентрализовать производство энергии и создаёт замкнутый цикл материалов и энергии.

- использование биоэнергии не приводит к усилению парникового эффекта, так как она по большей части нейтральна с точки зрения баланса CO_2 . Она выделяет лишь то количество двуокиси углерода, которое было поглощено растениями в процессе их роста. С точки зрения баланса CO_2 нет разницы в том, гниёт ли древесина в лесу или используется для производства энергии.

9.5.3.3 Классификация процессов производства биотоплива

В странах умеренного пояса в качестве биомассы для производства биотоплива могут быть использованы:

- отходы растениеводства, животноводства, птицеводства, звероводства;
- посадки быстрорастущих кустарников на землях, неудобных для сельскохозяйственного производства;
- отходы древесины от рубок ухода за лесом, выборочных санитарных рубок;
- твёрдые бытовые отходы жилых зданий и учреждений, предприятий общественного назначения (ТБО);
- жидкие пищевые отходы и органические осадки городских сточных вод в виде избыточного активного ила;
- промышленные отходы предприятий, в том числе отходы деревообработки и горючие отходы ряда других производств (ГПО);
- залежи ТБО и ГПО в короотвалах.

По своему происхождению их можно условно разделить на две группы: сельские (первые три вида) и городские (четыре последних вида).

На рисунке 9.5.3.2 дана классификация процессов производства биотоплива. Для этой цели используются термохимические, биохимические и агрохимические методы.

К термохимическим процессам относят прямое сжигание, пиролиз, газификацию и прочие термохимические процессы, различающиеся предварительной подготовкой сырья и контролем химического состава продуктов реакции.

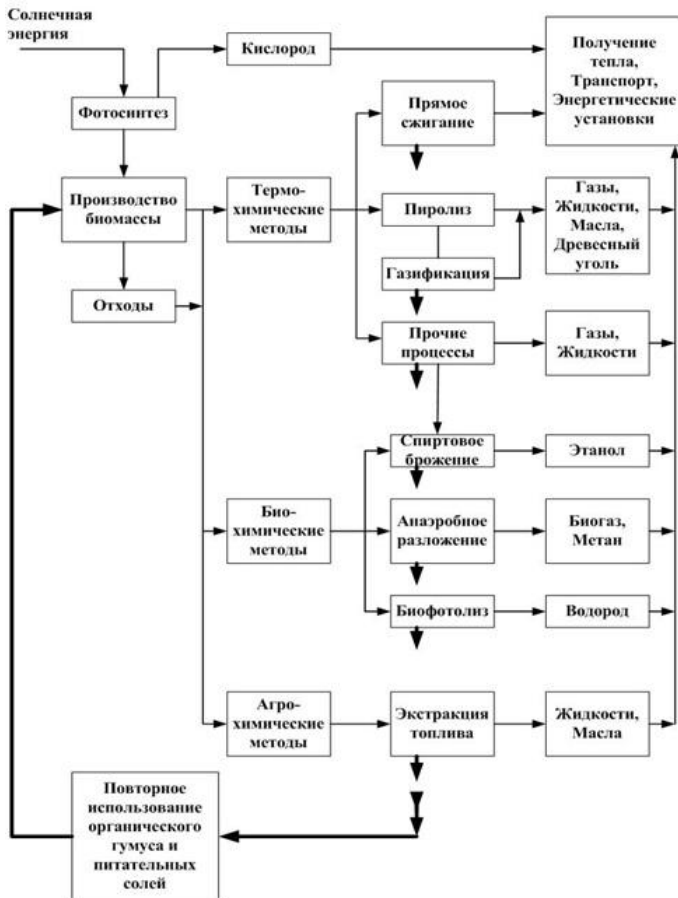


Рисунок 9.5.3.2. Процесс производства биотоплива

Прямое сжигание используется для непосредственного получения тепла. Для этой цели прежде всего используют твёрдую биомассу, а также свалочный газ из органических отходов мусорных свалок. К твёрдой биомассе относят все виды сухих или высушенных растений или их частей (в виде штучного или насыпного материала), в том числе древесина, древесные гранулы (пеллеты) и брикеты, древесная щепка, стебельчатая масса (солома и гранулы из соломы), шелуха какао-бобов, вишнёвые косточки, рисовая шелуха и т.п.

Пеллеты представляют собой небольшие по размеру прессованные шарики необработанной древесины, изготавливаемые обычно из коры, опилок или стружки. Они расфасовываются в мешки и поставляются как котельное топливо для каминов, домашних и промышленных котлов. Твёрдая биомасса и свалочные газы используются также для выработки электроэнергии в блочных мини-ТЭЦ.

Пиролиз - это нагрев биомассы при отсутствии воздуха, либо за счёт сгорания некоторой её части при ограниченном доступе воздуха. Состав продуктов зависит от температурных условий, типа сырья, способов ведения процесса. В результате получают газы, жидкости, масла, древесный уголь.

К биохимическим процессам относят спиртовое брожение, анаэробное разложение и биофотоллиз.

При спиртовом брожении (ферментации) из сахаров получают этиловый спирт - летучее жидкое топливо, которое можно использовать вместо бензина для транспортных средств. В настоящее время основными видами жидкого биотоплива являются биодизель и биоэтанол. Сырьём для биодизельного топлива являются растения, содержащие большое количество масла, такие как рапс, конопля, семена подсолнечника, пальмовые косточки, соя и орехи. Биоэтанол получают из биомассы, содержащей сахар или крахмал.

В результате анаэробного разложения (сбраживания) получается биогаз (смесь CO_2 и CH_4). Это аналог процессов в пищеварительном тракте жвачных животных.

Фотоллиз – это разложение воды под действием солнечного света на водород и кислород. Некоторые биологические организмы при определённых условиях тоже могут продуцировать водород. Этот процесс и носит название биофотоллиза.

К агрохимическим процессам относятся процессы получения жидких и твёрдых топлив прямо от живых или только что срезанных растений (из надрезов, под прессом). Такие топлива можно использовать как заменители бензина.

В таблице 9.5.3.1 приводятся некоторые наиболее значимые источники биомассы и технико-экономические характеристики получаемого из них биотоплива.

Таблица 9.5.3.1 - Источники биомассы и технико-экономические характеристики получаемого из нее биотоплива

Источники биомассы	Производимое биотопливо	Технология преобразования	Примерный КПД преобразования, %	Потребность в энергии для преобразования	$Q^p_{нр}$ МДж/кг
Лесоразработки	(Тепло)	Сжигание	70	Сушка	16-20
Отходы переработки древесины	(Тепло)	Сжигание	70	Сушка	16-20
То же	Газ, масла, нефть, уголь	Пиролиз	85	Сушка	40
Зерновые	Солома	Сжигание	70	Сушка	14-16
Сахарный тростник, сок	Этанол	Сбраживание	80	Электроэнергия, тепло	3-6
То же, отходы	Жмых	Сжигание	65	Сушка	5-8
Навоз (тропики)	Метан	Анаэробное разложение	50	Сушка	4-8
Навоз (умеренный пояс)	Метан	Анаэробное разложение	50	Тепло	2-4
Городские стоки	Метан	Анаэробное разложение	50	Тепло	2-4
Мусор	(Тепло)	Сжигание	50	Тепло	5-16

Ниже более подробно рассмотрены две технологии переработки биомассы: газификация и анаэробное сбраживание.

9.5.3.4 Газификация

Газификация - это пиролиз, приспособленный для максимального сбора (до 80% по массовой доле) газообразного топлива. Осуществляется в газогенераторах, которые могут ещё называться газификаторами, реакторами, конверторами.

Газогенераторы могут быть предназначены для переработки широкого ассортимента углеродсодержащего сырья: древесины, продуктов деревообработки, водорослей, сельскохозяйственных отходов, твёрдых бытовых отходов, в том числе, таких как бумага, картон, текстильные и кожаные изделия. Для обеспечения температурных условий протекания многообразных термохимических процессов в различных зонах газогенератора используется воздушное или кислородное дутьё. В некоторых случаях к воздуху добавляется водяной пар. В газогенераторе с воздушным дутьём обычно получают низкокалорийный топливный газ с теплотой сгорания Q_n^P от 3,0 до 5,6 МДж/м³, а в газогенераторах с кислородным дутьём – среднекалорийный топливный газ с теплотой сгорания от 7,5 до 13,0 МДж/м³. Помимо топливного газа продуктами термохимических реакций газогенератора являются топливная жидкость ($Q_n^P = 24,6$ МДж/кг) и углистое вещество ($Q_n^P = 31,65$ МДж/кг). Отходами газогенерации являются зола и шлак.

Классификация газогенераторов обычно проводится в соответствии с характером перерабатываемого углеводородного материала. Различают газогенераторы с неподвижным, движущимся, перемешивающимся, псевдоожиженным, вращающимся, проталкивающимся слоем сырья. По отношению к воздуху различают газогенераторы с восходящим и нисходящим потоком воздуха, а также с перекрещивающейся тягой. На рисунке 9.5.3.3 показана схема газогенератора с неподвижным слоем сырья и восходящим потоком воздуха.

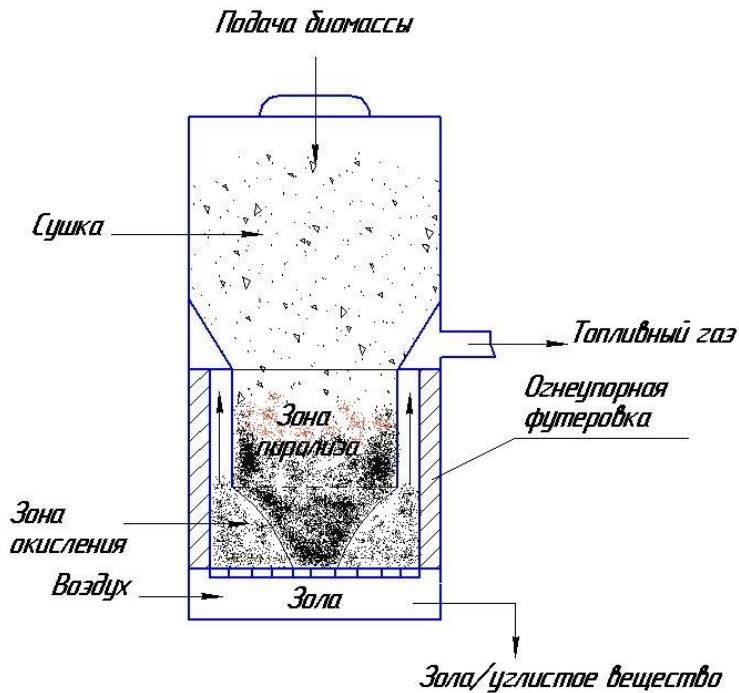
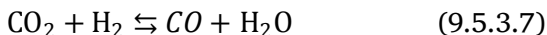
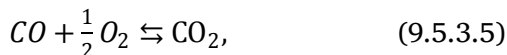


Рисунок 9.5.3.3. Газификатор с восходящим потоком воздуха (с неподвижным слоем сырья на решётке).

В зоне окисления ($t = 816-1482^{\circ}\text{C}$) углеродсодержащее вещество окисляется кислородом воздуха, образуя CO_2 . Эта экзотермическая реакция имеет существенное значение для обеспечения тепла, необходимого для завершения реакций в зонах восстановления ($816-1093^{\circ}\text{C}$), пиролиза ($427-816^{\circ}\text{C}$) и сушки ($204-427^{\circ}\text{C}$). Поскольку часть углеродсодержащего сырья используется для сгорания, КПД газификации редко превышает 70%. Однако тепловой КПД газификации, в процессе которой получают ещё топливную жидкость и углистое вещество, как правило, больше 70%.

Состав получаемого топливного газа зависит от степени равновесия протекающих реакций. Обычно все реакции горения обратимы:



И эта обратимость с повышением температуры возрастает. Равновесие реакции горения может быть сдвинуто путём изменения температуры или давления. В газовом потоке могут содержаться CO, H₂, CH₄, C₂H₄, C₃H₆, NH₃, H₂S, а также CO₂, H₂O, N₂ и избыточное количество кислорода O₂.

Одной из характерных особенностей низкокалорийного топливного газа является высокое содержание H₂ и H₂O. Типичный состав влажного газа в % по объёму на влажное вещество выглядит так: CO₂ – 9,9 %; CO – 18 %; H₂ – 16,54 %; CH₄ – 0,73 %; N₂ – 45,27 %; O₂ – 0,18 %; другие углеводороды – 0,28 %; H₂O – 9,1 %. Основными горючими составляющими здесь являются H₂ и CO, которые в совокупности называют ещё светильным газом.

Вследствие высокого содержания водорода в низкокалорийном газе при его горении в сравнении с горением природного газа образуется относительно больше паров воды, что приводит к некоторым потерям тепла.

В настоящее время большинство газогенераторов, предназначенных для газификации твёрдых отходов и биомассы, эксплуатируются при атмосферном давлении. С повышением давления производительность реактора увеличивается, поэтому

можно использовать аппарат меньшего объёма. В этом случае топливный газ не требует сжатия при доставке потребителю.

Низкокалорийный газ уже давно используется в шахтных печах металлургической промышленности. Для его сжигания в отопительных котельных необходимо использование специально сконструированных горелок с учётом его состава и степени загрязнённости (влага, пары, смола и кислые соединения), а также изменение в составе и структуре вспомогательного оборудования.

9.5.3.5 Анаэробное сбраживание

В естественных условиях разрушение любых видов биомассы, в том числе навоза животных, происходит в почвенном гумусе путём разложения на элементарные соединения под действием разлагающих организмов, грибов и бактерий. Для этого процесса предпочтительны сырость, тепло и отсутствие света. На конечной стадии процесса полное разложение происходит под действием множества (аэробных или анаэробных) бактерий.

Аэробные бактерии развиваются преимущественно в присутствии кислорода. Углерод биомассы окисляется до CO_2 . В замкнутых объёмах с недостаточным поступлением кислорода извне развиваются анаэробные бактерии с образованием биогаза (смеси CH_4 и CO_2). Питательные вещества, такие как соединения азота, сохраняются в качестве удобрений почвенного гумуса. Устройства для получения биогаза называют биогазогенераторами или метантенками. КПД процесса 60-90 %. В отходах резко уменьшается количество болезнетворных микроорганизмов (они погибают при анаэробном сбраживании).

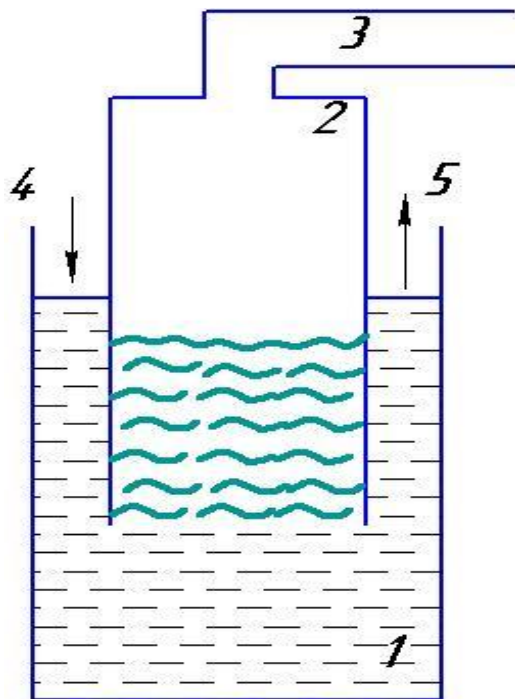
Длительность процесса может быть разной, от 8 до 30 суток и зависит от температуры. При более высоких температурах сбраживание идёт быстрее и характеризуется примерно удвоением

выхода биогаза на каждые 5°C. Различают в зависимости от температуры следующие режимы сбраживания:

- психрофильный – до 20°C;
- мезофильный – до 40°C;
- термофильный – до 60°C (с подводом теплоты).

На практике сбраживание редко ведут до конца, так как это сильно увеличивает длительность процесса. Обычно сбраживают примерно 60 % исходного продукта с выходом газа от 0,2 до 0,4 м³ на 1 кг сухого материала. При полном сбраживании биогаз состоит из 70 % CH₄ и 30 % CO₂ по массе. Есть ещё примеси H₂ и H₂S. Низшая теплотворная способность $Q_n^P = 20 - 22$ МДж/кг, плотность равна 1,12 кг/м³.

На рисунке 9.5.3.4 показана схема простейшего биогазогенератора, основными элементами которого являются ферментатор и газгольдер. Навоз загружается периодически с примесью культуры анаэробных бактерий из действующего ферментатора, который тоже надо периодически очищать от шлака.



1 – ферментатор; 2 – газгольдер; 3 – отвод биогаза; 4 – загрузка; 5 – очистка.

Рисунок 9.5.3.4. Схема простейшего биогазогенератора

Для фермерских хозяйств и крупных ферм в России, в Белоруссии и в Европе выпускаются автоматизированные биогазогенераторные установки (БГУ). Большинство БГУ основано на постоянном принципе действия. Это означает, что поступающее в них сырьё немедленно вытесняет отработанное. Свежая биомасса поступает непрерывно, отбор биогаза и удаление шлама производится по мере необходимости. Методы расчёта БГУ можно найти в прилагаемой к разделу литературе.

На рисунке 9.5.3.5 показана зависимость удельного выделения биогаза v от температуры процесса метаногенеза по отношению к выделению при $t = 33^\circ\text{C}$, полученная Н.Д. Шишкиным в Астраханском государственном техническом университете (АГТУ). В качестве сырья

в различных соотношениях использовался навоз крупного рогатого скота, овец и свиней. Длительность опытов изменялась от 10 до 30 суток. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются эмпирической зависимостью:

$$v = v_{33} \cdot (1,1 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 0,2), \quad (9.5.3.8)$$

где v_{33} – удельный выход биогаза в $\text{м}^3/\text{кг}$ при $t=33\text{ }^\circ\text{C}$; t – температура процесса, $^\circ\text{C}$.

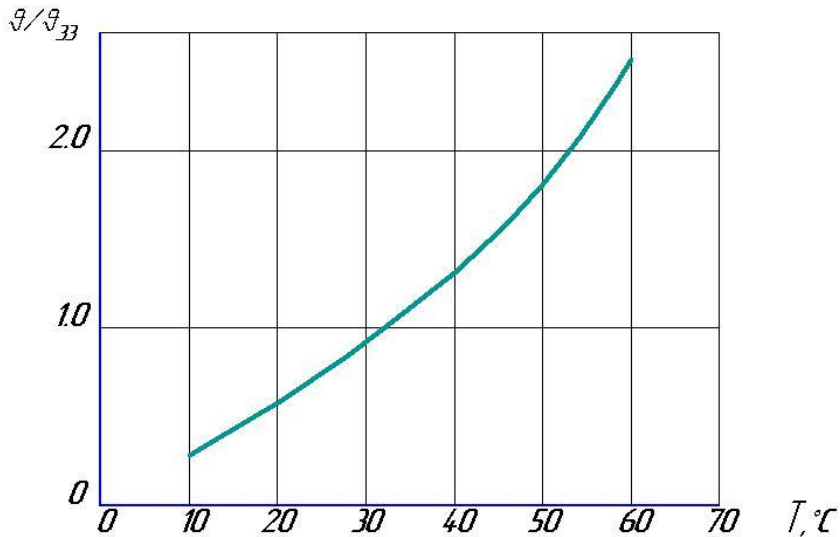


Рисунок 9.5.3.5. Влияние температуры процесса метаногенеза на величину относительного выхода биогаза

Уравнение теплового баланса биогазогенератора можно представить в виде:

$$E_{\text{сов}} + Q_{\text{сн}} + Q_{\text{хр}} = E + E_{\text{ост}} + Q_{\text{ос}}, \quad (9.5.3.9)$$

где: $E_{\text{сов}}$ - химически связанная энергия сухого органического вещества; $Q_{\text{сн}}$ - теплота, затраченная на собственные нужды; $Q_{\text{хр}}$ - теплота экзотермических химических реакций;

E – химически связанная энергия биогаза; $E_{\text{ост}}$ - химически связанная энергия остатков биомассы; $Q_{\text{ос}}$ - потери теплоты через ограждающие поверхности в окружающую среду.

Энергетический КПД биогазогенератора - это отношение химически связанной энергии товарного биогаза (за вычетом теплоты, затраченной на собственные нужды) к химически связанной энергии в сухом веществе биомассы:

$$\eta_{\text{БГУ}} = \frac{E - Q_{\text{сн}}}{E_{\text{сов}}} \quad (9.5.3.10)$$

Для современных отечественных БГУ его величина изменяется в пределах от 0,4 до 0,6.

9.5.3.6 Производство биотоплива для энергетических целей

Энергетические фермы. Этот термин в очень широком смысле слова используется при обозначении предприятий для производства биомассы в качестве основного или дополнительного продукта: сельскохозяйственного производства (поля, птицефермы, животноводческие фермы), лесоводства (леса), аквакультуры (пресные и морские воды), а кроме того, тех видов бытовой и промышленной деятельности, в результате которых образуются органические отходы. Сюда же можно отнести систему ЖКХ и промышленные предприятия.

Одним из основных потребителей энергетической фермы является биогазовая (БГУ) или биоэнергетическая (БЭУ) установка, предназначенная для производства тепловой, механической или электрической энергии. БЭУ, предназначенные для совместной выработки электрической и тепловой энергии могут быть квалифицированы как БиоТЭЦ.

Энергетические фермы, на которых осуществляется выращивание и комплексная переработка биомассы с получением побочной товарной продукции, называют биоэнергетическими комплексами (БЭК) или энергобиологическими комплексами (ЭБК).

Невыгодность транспортировки биомассы на большие расстояния диктует необходимость её использования в

непосредственной близости от производства. Эта задача особенно актуальна для объектов, удалённых от систем централизованного тепло- и электроснабжения: в сельской местности, в пустынных, горных и северных районах. В этом случае речь может идти об автономных теплоэнергетических комплексах (АТК).

В АТК наряду с БГУ можно использовать и другие ВИЭ, такие как Солнце, ветер, малые ГЭС и др. Такое комплексное использование ВИЭ позволяет существенно увеличить термодинамическую и энергетическую эффективность использования энергоресурсов.

Морфология основных элементов АТК с ВИЭ разработана Н.Д. Шишкиным в АГТУ. По его данным, если в БГУ можно получить КПД порядка 0,4 – 0,6, то БЭУ с использованием ещё и гелиоустановок позволяет получать КПД до 0,75 – 0,80, а с использованием ветроэнергетических установок даже до 0,85 – 0,90. С учётом необратимых потерь при аккумулировании, передаче и использовании энергии КПД будет на 2 – 3 % ниже.

Наиболее характерный пример энергетической фермы с БЭК представляют собой предприятия по выращиванию и переработке сахарного тростника. Наряду с производством тепловой и электрической энергии здесь получают фанеру, сахар, корма для животных и другие продукты (рисунок 9.5.3.6).

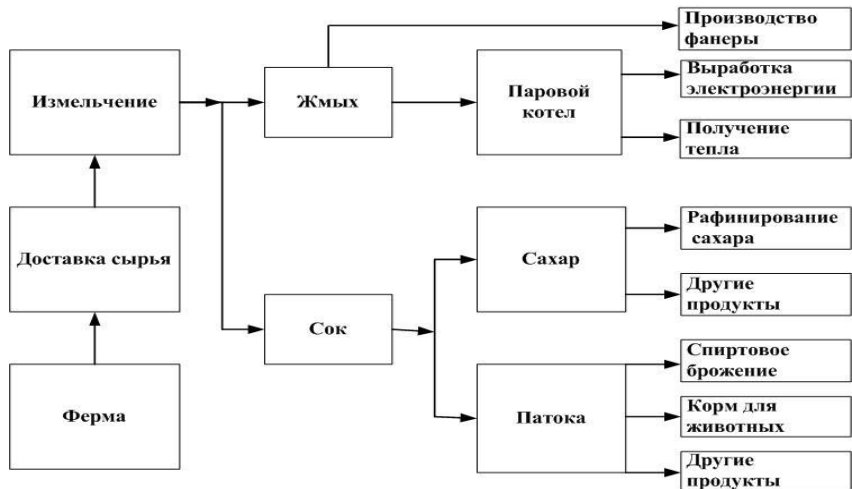


Рисунок 9.5.3.6. Агропромышленная переработка сахарного тростника

Другим примером комплексного использования биомассы является биогазовая установка на острове Рюген в Германии. Здесь в цикл экологически чистого производства энергии и вещества включены Солнце, ветер, биомасса агропромышленных и животноводческих ферм, сточные воды бытовых и промышленных объектов, торговли и сферы обслуживания. На основе получаемого биогаза производятся: тепловая и электрическая энергия, удобрения для сельскохозяйственных культур. Отоплением и горячим водоснабжением от БЭУ Pastitz в городе Putbus обеспечиваются жилые дома, детский сад, спортзал, педагогическое училище, реальная школа. Годовая выработка электроэнергии к началу 2000 г. составляла 5000 МВт*ч.

Примером ЭБК в отечественной энергетике является комплекс при Курской АЭС, реализованный в рамках Государственной научно-технической программы «Экологически чистая энергетика». Авторами проекта являются институты «Гидропроект», «Атомэнергопроект» и ряд других организаций. На базе комплексного использования сбросного тепла АЭС решается целый

ряд социально-экономических и природно-охранных задач: снижение теплового загрязнения окружающей среды; повышение коэффициента полезного использования топлива; биологической мелиорации водоёмов; гарантированного производства продуктов питания (рыбы) и др. (см. рисунок 9.5.3.7). В состав базового ЭБК входят блоки: рыбохозяйственный, открытого обогреваемого грунта, тепличный, утилизации отходов, биологической мелиорации водоёмов-охладителей.

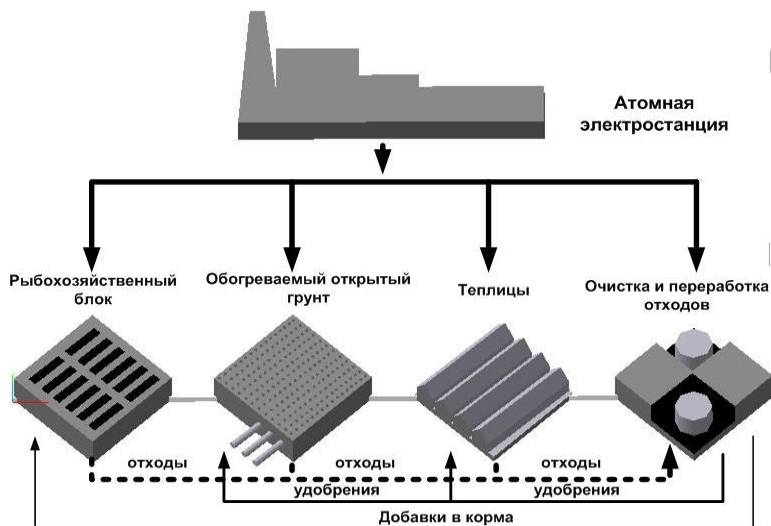


Рисунок 9.5.7. Принципиальная схема ЭБК Курской АЭС

Органические отходы перерабатываются двумя способами: метановым сбраживанием и ускоренным компостированием.

9.5.3.7 Технологии обезвреживания и утилизации твёрдых бытовых и промышленных отходов

В АТК используются в основном органические отходы «сельского» происхождения, которые перерабатываются двумя способами: анаэробного сбраживания в метантенках и ускоренным компостированием. Для биомассы «городского» происхождения, прежде всего для ТБО и ГПО (ТБПО), эти способы не могут дать

нужного эффекта. Здесь используются иные методы утилизации, такие как:

- складирование на полигонах (свалки);
- прямое сжигание с утилизацией тепла;
- компостирование;
- комплексное компостирование (гранулы) и сжигание некомпостируемых фракций;
- глубокая высокотемпературная переработка в высокотемпературных шахтно-доменных печах;
- плазменная переработка и др.

Ниже рассматриваются их основные характеристики.

Складирование на полигонах приводит к разрастанию свалок вблизи городов и посёлков. Срок обезвреживания не менее 20 лет. Возможно загрязнение грунтовых вод и атмосферы. Нет никаких побочных продуктов. При соответствующем обустройстве возможно получение свалочного газа.

Сжигание с утилизацией тепла приводит к полному обезвреживанию за 1 час. Удельная занимаемая площадь составляет $0,25 - 0,5 \text{ м}^2/\text{т}$ ТБПО в год. Отходы в виде золы и шлака составляют 25 – 30% от массы ТБПО. Грунтовые воды не загрязняются, но есть загрязнение атмосферы (в пределах нормы). Можно получать тепловую энергию в количестве 1,5 Гкал/т ТБПО.

Компостирование приводит к обезвреживанию примерно за 2 суток и требует удельной площади $0,4 - 0,6 \text{ м}^2/\text{т}$ ТБПО в год. Загрязнение атмосферы незначительное. Загрязнений грунтовых вод нет. Отходы некомпостируемых фракций составляют от 25 до 30 % от массы ТБПО. Компост как коммерческий продукт составляет 50 - 60 % от массы ТБПО. Тепловая энергия – до 0,4 Гкал/т ТБПО.

Комплексное компостирование (гранулы) и сжигание некомпостируемых фракций требует удельной занимаемой площади

0,25 – 0,5 м²/т ТБПО в год. Обезвреживание обеспечивается только при использовании гранул. Загрязнений грунтовых вод и атмосферы на территории завода нет. Выход компоста от массы ТБПО составляет 30 %, топливные гранулы – до 41 %, отходы (балласт) – от 4 до 5 %. Получение тепловой энергии до 1,5 Гкал/т ТБПО.

Глубокая высокотемпературная переработка (пиролиз) в высокотемпературных шахтно-доменных печах (ВШДП) предполагает полное обезвреживание ТБПО без их сортировки за несколько минут при отсутствии отходов производства и без загрязнений атмосферы и грунтовых вод. Площадь переработки ТБПО не разрастается во времени. Полезными коммерческими продуктами являются: электроэнергия, товарный синтез-газ, чёрный металл, базальтовые волокна, строительные материалы.

Плазменная переработка позволяет утилизировать твёрдые радиоактивные отходы, содержащие как горючие, так и негорючие компоненты, с получением шлакового компаунда, пригодного для окончательного захоронения или длительного контролируемого хранения при максимальной безопасности для персонала и окружающей среды.

Вопрос об обращении с ТБПО в России до сих пор является одним из дискуссионных. Но решать его срочно необходимо, так как производство ТБО в год всё время возрастает. В странах ЕС каждый городской житель производит от 400 до 520 кг ТБО в год. В крупных городах России этот показатель ниже. Например, для Москвы – это около 300 кг на человека. Тем не менее, в Москве ежегодно образуется 22 млн. т отходов, в том числе 5,2 млн. т ТБО. Складирование на полигонах приводит к чрезмерному разрастанию свалок вблизи городов и посёлков. В Калининградской области на свалку ежегодно вывозится в среднем 400 тыс. т ТБПО, энергетический потенциал которых оценивается в $(2,0 - 3,2)10^{15}$ Дж,

что эквивалентно (68 – 109) тыс. тут при их прямом сжигании. Общий энергопотенциал всех отходов России составляет (6 – 8) млн. тут в год.

В зарубежных странах дискуссии о захоронении ТБПО или выборе того или иного метода их утилизации уже практически не ведутся. Там задействованы все методы переработки, включая рециклинг (извлечение из отходов вторичного сырья) на основе раздельного сбора, сортировку и компостирование. Однако основным и заключительным этапом на пути комплексного решения проблемы санитарной очистки крупных городов и посёлков от отходов является сжигание ТБПО на мусоросжигательных заводах (МСЗ) с выработкой тепловой и электрической энергии.

Это связано прежде всего с тем, что затраты на сжигание отходов почти в четыре раза меньше, чем на их переработку. Современные методы очистки уходящих газов и летучей золы делают МСЗ экологически безопасными предприятиями, которые могут располагаться в промышленных зонах вблизи городов. Шлак и гранулы, полученные при обезвреживании летучей золы, которые составляют 10 – 15 % от массы сожжённых отходов, относятся к 4 классу опасности и могут быть использованы в качестве подсыпки дорог в дорожном строительстве и на полигонах ТБО.

Являясь экологически безопасными предприятиями, современные МСЗ могут взять на себя роль в обеспечении городов и посёлков тепловой и электрической энергией. Зарубежный опыт использования МСЗ чрезвычайно разнообразен – от чистого получения электрической или тепловой энергии до их совместной выработки, превращая их в ТЭЦ. Иногда используется принцип совместного использования традиционного органического топлива в водогрейных и паровых котлах и сжигания ТБПО в

мусоросжигательных котлах (МСК). В этом случае мы имеем дело с комплексными районными тепловыми станциями (КРТС).

В настоящее время за рубежом основная часть ТБПО утилизируется на КРТС. В Европе эксплуатируется более 420 таких предприятий и наблюдается устойчивая тенденция к их увеличению. В Германии и Франции суммарная производительность КРТС за десятилетие с 1998 г. по 2007 г. увеличилась в 1,4 раза, а в Италии более, чем в 2,3 раза. В Японии с 1964 г. по 2000 г. доля ТБПО, перерабатываемых термическим способом, возросла с 45,5 % до 77,4 %. В Китае в 2007 г. находилось в эксплуатации 55 таких предприятий общей установленной мощностью около 16 млн. т отходов в год. В США ежегодно сжигается 33,5 млн. т ТБПО с производством более 17 млрд. кВтч электроэнергии.

Наибольших успехов в области промышленной переработки ТБПО достигла Германия, правительство которой ратифицировало соглашение стран Евросоюза и приняло закон, запрещающий с 1 июня 2005 г. вывоз на полигоны органических отходов, в том числе ТБО, без предварительной подготовки. Одной из первых КРТС была ТЭЦ в г. Бремерхафен, введённая в эксплуатацию в 1977 г. На сегодняшний день в Германии эксплуатируется или находится на стадии строительства и проектирования более 90 предприятий термической переработки ТБПО, а суммарная мощность действующих установок достигает 18 млн. т в год.

В России концепция использования «городской» группы биотоплива наряду традиционным органическим топливом была разработана ещё в 1996 г. Институтом теплофизики Сибирского отделения РАН. Объёмы ТБО и ГПО в городах таковы, что их сжигание позволит почти полностью удовлетворить потребности в горячем водоснабжении даже в условиях Сибири, что составляет 15-20 % от общего годового теплопотребления. Всё основное

оборудование для КРТС уже разработано и может быть изготовлено в России. Принципиальная тепловая схема такой КРТС показана на рисунке 9.5.3.8.

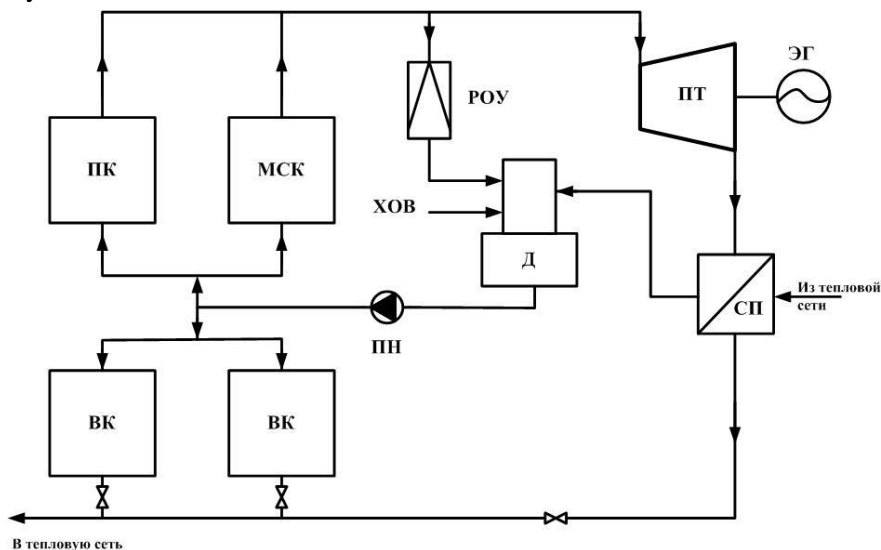


Рисунок 9.5.3.8. Принципиальная тепловая схема КРТС, использующей ТБПО в качестве одного из двух основных топлив

Здесь перегретый пар, полученный в традиционном и мусоросжигательном котлах (ПК и МСК) подается в паровую турбину с противодавлением ПТ, которая работает на электрический генератор ЭГ. Отработавший в турбине пар направляется в сетевой подогреватель СП, где конденсируется и подогревает обратную воду из тепловой сети. В отопительный сезон и на случай ремонта ПК и МСК в схему включены водогрейные котлы ВК. Подготовка питательной воды для котлов осуществляется в деаэраторе Д, куда наряду с конденсатом от СП поступает добавочная химически очищенная вода ХОВ. Режим работы деаэратора обеспечивается частью перегретого пара от котлов, который через редукционно-охладительное устройство РОУ подается в деаэратор. Для подачи воды в котлы используются питательные насосы ПН.

Пилотный проект опытной КРТС этого типа осуществлён в г. Бердск Новосибирской области. Технологическая часть экологически чистого сжигания ТБПО и утилизации твёрдых остатков разработана в ОАО НПФ «Техэнергохимпром» (г. Бердск). Технология очистки и обезвреживания дымовых газов разработана Новосибирским государственным проектно-изыскательским институтом «ВНИПИЭТ». Срок окупаемости такой КРТС близок к сроку окупаемости ТЭЦ на угле.

9.5.3.8 Состояние и перспективы развития биоэнергетики в России и за рубежом

Что касается зарубежной практики, то, как это отмечалось выше, ТБПО уже заняли достойное место среди класса «альтернативный вид топлива» и широко используются в этом качестве для выработки тепловой и электрической энергии. В частности, в Европе тенденция увеличения количества отходов, перерабатываемых термическими методами, достаточно устойчивая. В Европе уже сейчас ежегодно сжигается 69 млн. т ТБПО и вырабатывается более 28 млрд. кВтч электроэнергии и примерно 69 млрд. кВтч тепловой энергии (см. рис.9.5.3.9). Это позволяет экономить до 38 млн. т органического топлива и предотвращать выбросы в атмосферу парниковых газов (в пересчёте на CO₂) до 37 млн. т в год.

Спектр использования энергопотенциала ТБПО очень разнообразен - от чистого получения электрической или тепловой энергии до их совместной выработки. Оптимальный выбор типа производства зависит от местных условий потребления тепловой и электрической энергии, мощности предприятия, существующих тарифов на покупку энергии и других причин, что существенно влияет на стоимость и экономичность КРТС в целом.

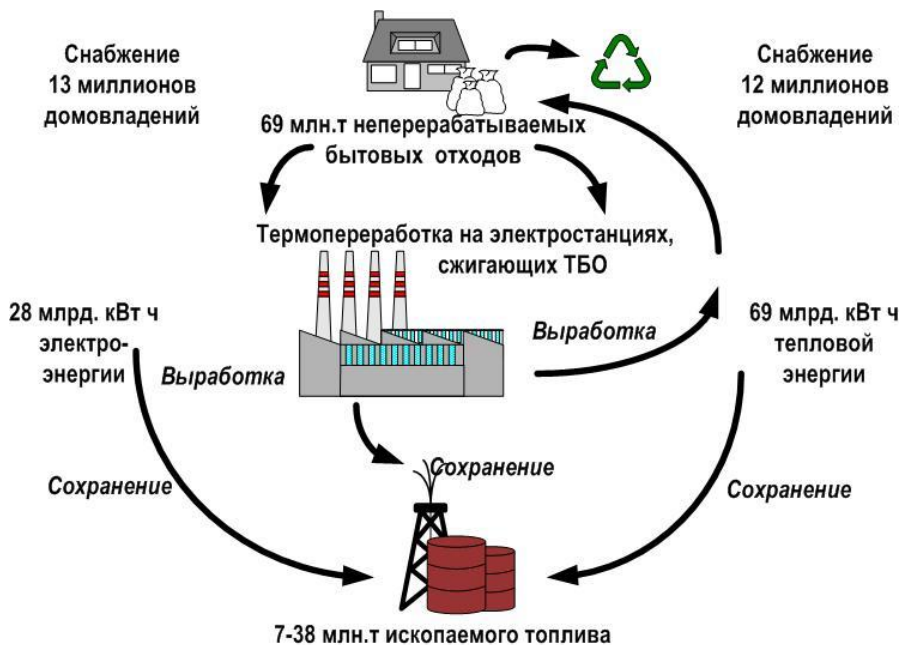


Рисунок 9.5.3.9. Использование ТБПО в энергетических целях в Европе

Что касается России, то пока только Московская и Новосибирская области приобретают опыт энергетической утилизации ТБПО и на законодательном уровне делают первые шаги по решению проблемы очистки городов от отходов. На этом пути необходимо преодолеть целый ряд барьеров: психологический, экономический, законодательный, технический, информационно-организационный.

Одним из перспективных направлений является рациональный подход к использованию древесного топлива. Россия обладает собственными лесными ресурсами, составляющими 24 % мировых. Годовой прирост древесины равен 10^9 м³, возможный объём её заготовки может обеспечить в переводе на условное топливо 38 млн. т. Необходимо только по-хозяйски распорядиться этой возможностью. Качество древесины как топлива делает её пригодной для БЭУ малой мощности, вполне конкурентоспособных с

дизельэлектрическими установками (ДЭУ) сопоставимой мощности. В России уже выпускается соответствующее оборудование для таких установок.

Другое направление использования биомассы - это биоконверсия органических отходов растениеводства, животноводства, птицеводства, органической составляющей сточных вод и пищевых отходов. В результате биоконверсии помимо биогаза можно получать ещё экологически чистые удобрения. В России разрабатываются и выпускаются такие установки мощностью от 0,02 до 600 м³/сут по исходному субстрату и с объёмом реактора от 0,2 до 3000 м³. Их можно классифицировать по объёму биореактора на следующие четыре типа:

- малые, семейного типа, до 20 м³;
- фермерские, от 20 до 200 м³;
- средние, от 200 до 500 м³;
- большие, свыше 500 м³.

Малые можно использовать на садово-огородных участках и при арендном подряде. Срок окупаемости таких установок 1-2 года. Их широкое распространение сдерживается лишь ограниченным платёжеспособным спросом.

В качестве примера фермерской БЭУ для переработки навоза и помёта птиц в электроэнергию, биогаз и удобрения можно привести БЭУ типа «КОУД». Здесь в стандартном исполнении биореактор объёмом 6 м³ перерабатывает 0,3 м³/сут сырья. На выходе можно получить 0,6 т органических удобрений и 24 м³/сут биогаза для выработки 48 кВтч электроэнергии, что приводит к экономии 17 кг топочного мазута. Установка может быть использована для фермы на 15-20 голов КРС, свинофермы на 150-180 голов или птицефермы на 1500-1800 голов. Её стоимость на 04.10.2006 г. составляла 160 тыс. руб.

Аналогичные БЭУ производятся в Белоруссии. Здесь ещё в 2009 г. были разработаны основные требования к размещению и проектированию биогазовых комплексов и приняты соответствующие нормативные акты. Для расчёта возможного количества биогаза, получаемого от содержания животного, введено понятие одной животной единицы, которой соответствуют: 1 взрослая корова, 5 телят, 6 свиней, 250 куриц.

В средней по мощности БЭУ с объёмом биореактора 300 м³, которая производится в Белоруссии (г. Могилёв) для анаэробного сбраживания до 25 т/сут навозных стоков в термофильном режиме ($t = 55^{\circ}\text{C}$) с влажностью до 95 %, на выходе можно получить в год:

- 807,7 тыс. кВтч электроэнергии по себестоимости 3,6 руб./кВтч;
- 2912 ГДж тепловой энергии по себестоимости 987 руб./ГДж;
- 9 млн. литров (25 тыс. л/сут) экологически чистых удобрений (без нитратов и нитритов).

Производство биогаза составляет - 750 м³/сут, 30 % из них идёт на собственные нужды термофильного режима. Общая стоимость оборудования, монтажа, наладки и строительных работ оценивается примерно в 7 млн. руб. При реализации только 20 % расфасованных жидких удобрений срок окупаемости проекта составляет 2 года.

Но, как уже отмечалось ранее, в условиях России наибольшего эффекта можно ожидать от АТК, где наряду с биомассой могут использоваться другие ВИЭ - энергия Солнца, ветра, малых ГЭС, геотермальных источников. Нельзя исключить и комплексное использование биомассы с традиционными видами топлив. Вопрос о выборе той или иной энерготехнологии должен решаться с учётом её технико-экономических и экологических показателей, а также

региональных особенностей, в которых будет эксплуатироваться АТК.

На рисунке 9.5.3.10 показана возможная схема размещения биоэнергетических комплексов на базе крупных сельскохозяйственных предприятий в Калининградской области, а на рисунке 9.5.3.11 – принципиальная схема такого АТК.



Рисунок 9.5.3.10. Возможное размещение крупных БЭК в Калининградской области



Рисунок 9.5.3.11. Принципиальная схема крупного биоэнергетического комплекса

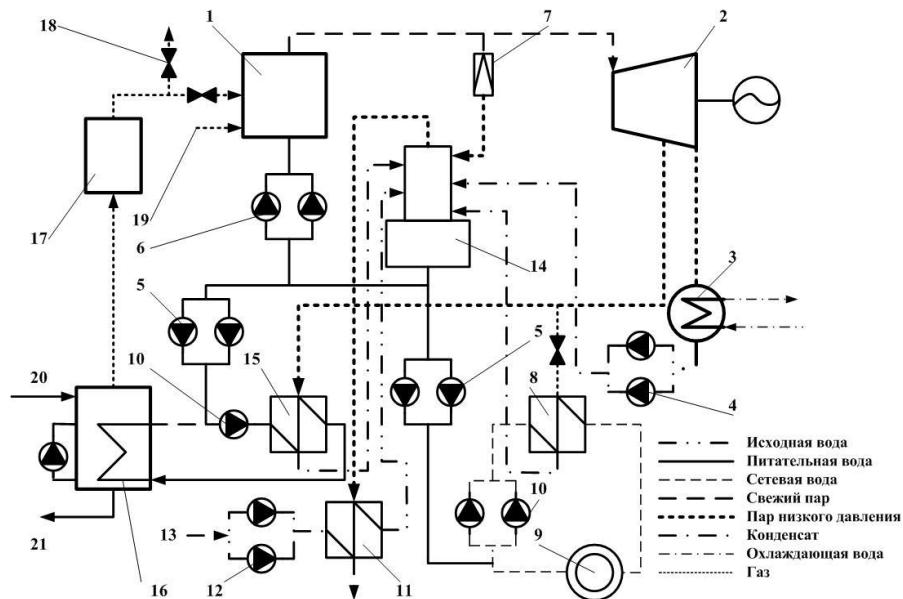
В качестве пилотного проекта для Калининградской области можно реализовать АТК на базе животноводческого хозяйства ЗАО им. Горького в Правдинском районе, имеющем 2960 голов КРС, 20 лошадей и 940 свиней. Потенциал по биомассе (навоза) обеспечит получение 4630 м³/сут биогаза, что эквивалентно мощности в 826 кВт. За вычетом 30 % затрат тепла на собственные нужды биогазогенератора остаётся 3240 м³/сут биогаза для замещения традиционного органического топлива, что в переводе на условное топливо составляет 0,9 тыс. т в год.

Ещё одним вариантом АТК мог бы стать ЭБК на базе очистных канализационных сооружений в посёлке Заостровье Калининградской области (ГП «ОКОС»). На площадке очистных сооружений этого предприятия производится очистка сточных вод курортной зоны с последующим сбросом очищенных стоков в

Балтийское море. Проектная производительность очистных сооружений составляет 40 тыс. м³/сут. При модернизации предприятия возможно получение биогаза из осадков сточных вод, прошедших биологическую обработку (активного ила), и пищевых отходов ЖКХ, собранных в курортной зоне и трёх районах Калининграда. ЭБК будет работать в режиме ТЭЦ, выполненной либо в паротурбинном, либо в газотурбинном варианте. Произведённая электроэнергия будет использована для обеспечения собственных нужд предприятия, а тепловая энергия - на отопление и горячее водоснабжение зданий и сооружений ГП «ОКОС» и соседнего посёлка, а также на поддержание термофильного режима в метантенке. Избыток электроэнергии планируется продавать наряду с экологически чистыми удобрениями, полученными в метантенке. В период остановок турбоагрегатов биогаз будет направляться на газобаллонную станцию для аккумуляции и последующей коммерческой реализации. В качестве резервного топлива предполагается использование природного газа.

Паротурбинный вариант принципиальной тепловой схемы БЭК ГП «ОКОС» показан на рисунке 9.5.3.12. Принцип её работы поясняют подрисуночные обозначения.

Концепция использования «городской» группы топлива в КРТС, где наряду с одним из традиционных видов топлива должны сжигаться сортированные ТБО и ГПО в топках МСК также может быть реализована в Калининградской области. В качестве пилотных вариантов таких КРТС в Калининграде предлагаются два - на базе РТС «Южная» и на базе РТС «Восточная».



1 – паровой котёл; 2 – паровая турбина с теплофикационным отбором пара; 3 – конденсатор; 4 – конденсатный насос; 5 – подпиточный насос; 6 – питательный насос; 7 – РОУ; 8 – сетевой подогреватель; 9 – тепловые потребители; 10 – сетевой насос; 11 – подогреватель химически очищенной воды; 12 – насос химически очищенной воды; 13 – вода из цеха ХВО; 14 – деаэратор; 15 – подогреватель метантенка; 16 – метантенк; 17 – газгольдер; 18 – биогаз на газобаллонную станцию; 19 – природный газ; 20 – осадок сточных вод; 21 – удобрение.

Рисунок 9.5.3.12. Тепловая схема БЭУ ГП «ОКОС»

На базе РТС «Южная» имеется резервная площадка для размещения нового оборудования: бункера приёма ТБО, мусоросжигательного цеха и цеха очистки газов. Установка двух мусоросжигательных котлов Бийского котельного завода КЕ-6,5-14 ТБО позволит сжигать 3,2 т/ч ТБО, образующихся в Московском районе Калининграда и обеспечивать работу двух паровых турбин с противодавлением Калужского турбинного завода мощностью по 1250 кВт. Годовая выработка электроэнергии при работе турбин на номинальной мощности составит 10950 кВтч, что значительно

превышает её расход на собственные нужды (8870 кВтч в 2004 г.) и позволяет отказаться от её покупки. Годовая экономия средств при этом составит 11,2 млн. руб. Годовая выработка тепла на базе отработавшего в турбинах пара составит примерно 100 тыс. Гкал, причём 29 % этой энергии за счёт сжигания ТБО. Годовая экономия природного газа составит 3900 т.у.т, что в денежном выражении соответствует 5,2 млн. руб. По данным Института теплофизики Сибирского отделения РАН срок окупаемости таких КРТС составляет 2-4 года. Аналогичные сроки указываются и в зарубежных источниках.

Предварительные проработки в студенческих дипломных проектах по КРТС на базе РТС «Восточная» дали похожие результаты.

Наконец, в Калининградской области может быть реализована идея метода глубокой высокотемпературной переработки ТБПО в ВШДП без их предварительной сортировки с получением синтез-газа, имеющего теплотворную способность от 6300 до 8400 кДж/м³. Этот метод, разработанный в России ООО НПЦ «Поиск-ПЛИС», позволяет наряду со свежими ТБПО перерабатывать залежи свалочного материала, в результате чего на месте свалочных полигонов получают экологически чистые территории и земельные участки, пригодные для любой хозяйственной деятельности, включая жилищное строительство, ведение сельхозработ, организацию лесопарковых зон и т.п.

Разработан мощностной ряд модулей ВШДП на переработку 30000, 60000, 150000, 200000 тыс. т ТБПО в год. Отличительными особенностями этих модулей являются:

- полная и глубокая экологически чистая переработка отходов;
- герметически замкнутый цикл высокотемпературной переработки отходов при пониженном давлении;
- практически полное отсутствие собственных отходов.

В частности модуль ВЩДП-60 позволяет получать в год 120 млн. кВтч электроэнергии, 120 млн. м³синтез-газа, 10 тыс. т чёрного металла, 12 тыс. т базальтовых волокон и 11 тыс. т строительных материалов.

Пилотным проектом для КРТС, работающей на синтез –газе от ТБПО-60, могла бы стать КРТС на базе бывшего ЦБЗ в г. Советск Калининградской области. Использование в ВЩДП «свежих» ТБПО из городов Советск и Неман вместе с частью залежей ТБПО на свалке, находящейся практически в черте Советска, можно комплексно решить целый ряд проблем:

- утилизации всех ТБПО в этих двух городах;
- обеспечить круглогодичное теплоснабжение и горячее водоснабжение Советска;
- ликвидировать в течение 16 лет свалочный полигон в городе, а освободившуюся территорию использовать для иных целей.

Кроме того, сделаны предварительные проработки другого варианта аналогичной КРТС на базе ныне существующей свалки вблизи Калининграда, где за ряд десятилетий скопилось уже более т отходов. В случае задействования в работе трёх ТБПО-60 для переработки всей массы «свежих» городских отходов и накопившихся залежей можно комплексно решить следующие очень важные региональные проблемы:

- отказаться от поиска новой территории для свалочного полигона;
- очистить существующий полигон в течение примерно 40 лет и передать эту территорию городу для иных целей
- обеспечить теплоснабжением новую промышленную зону и прилегающую к ней жилой массив;
- существенно улучшить экологическую обстановку в акватории Калининградского залива.

9.5.4 Практические вопросы и решения

1. Дайте общее понятие о фотосинтезе и его эффективности (КПД).
2. Назовите основные физико-технические характеристики биомассы.
3. Дайте классификацию процессов производства биотоплива.
4. Что такое газификация?
5. Охарактеризуйте условия процесса анаэробного сбраживания.
6. Изобразите схему действия биогазогенератора.
7. Что представляет собой уравнение теплового баланса биогазогенератора?
8. Каков порядок расчёта биогазогенератора, использующего отходы животноводства?
9. Что такое «энергетическая ферма», биоэнергетическая установка (БЭУ), БиоТЭЦ?
10. Что такое автономный теплоэнергетический комплекс (АТК)?
11. Дайте классификацию технологий обезвреживания и утилизации твёрдых бытовых и промышленных отходов (ТБПО).
12. Что такое комплексная районная тепловая станция (КРТС)? Приведите её принципиальную схему.
13. Основные экологические проблемы биоэнергетики с АТК и КРТС.
14. Приведите примеры действующих АТК в России и в Германии.
15. Приведите примеры действующих КРТС в России, в Германии, в Японии.
16. Каковы перспективы создания АТК и КРТС в Калининградской области?

Студент может найти вопросы для самоконтроля по ссылке:
http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU.

9.5.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)

1. David H. Thomas. Energy Efficiency Through Combined Heat and Power or Cogeneration, 2010
2. Grzegorz Spychalski, Frank Pudel, Zaikov G. E. Renewable Resources and Biotechnology for Material Applications, 2011
3. Andrea Monti. Switchgrass. A Valuable Biomass Crop for Energy, 2012
4. Ali Sayigh. Comprehensive Renewable Energy, 2012
5. Bain R.L. Worldwide Biomass Potential : Technology Characterizations, 2010
6. Li Zhengqi. Corn Straw and Biomass Blends : Combustion Characteristics and No Formation, 2009
7. Franck Dumeignil, Angela Dibenedetto, M. Aresta. Biorefinery : From Biomass to Chemicals and Fuels, 2012
8. Ramesh C. Bansal, Ahmed F. Zobaa. Handbook of Renewable Energy Technology, 2011
9. Thomas E. Rommer. World Biofuels Production Potential, 2010
10. Bratt P. Haas. Ethanol Biofuel Production, 2009
11. James R. Thomas. Industrial Biotechnology and the U.S. Chemical and Biofuel Industries, 2009
12. Kathleen McAllister, Patricia Koshel. Transitioning to Sustainability Through Research and Development on Ecosystem Services and Biofuels : Workshop Summary, 2008

13. Kathleen McAllister, Patricia Koshel. Expanding Biofuel Production and the Transition to Advanced Biofuels : Lessons for Sustainability From the Upper Midwest: Summary of a Workshop, 2010
14. Alfred P. Haggerty. Biomass Crops : Production, Energy and the Environment, 2011
15. Albrecht Levi, Jean-Pierre Bateau. Biomass Gasification : Chemistry, Processes, and Applications, 2009
16. BentSørensen. Renewable Energy : Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy, and Planning Aspects, 2004
17. John R.Fanchi, Christopher J.Fanchi. Energy in the 21st Century, 2011
18. Zhen Fang, Jorge Mario Marchetti. Biodiesel : Blends, Properties, and Applications, 2011
19. Amit Sarin. Biodiesel : Production and Properties, 2012
20. Jorge Mario Marchetti. Biodiesel Production Technologies, 2010
21. V. G.Cho, W. H.Lee. Handbook of Sustainable Energy, 2010
22. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ./ Под.ред. С. Соуфера, О. Заборски.-М.: Мир, 1985.- 368 с.
23. Панцхава Е. Биомасса – источник топлива и энергии / Е. Панцхава, В. Пожарнов, Н. Кошкин // Энергия: экономика, техника, экология. – 2002 - № 9. – С. 21-25.
24. Панцхава Е.С. Биотопливо и энергетика. Возможности России / Е.С. Панцхава, В.А. Пожарнов // Теплоэнергетика. – 2006. № 3. – С.65-78.
25. Панцхава Е.С. Биоэнергетика России – настоящее и будущее (биоэнергетика и политика) / Е.С. Панцхава, М.М. Шипилов, Н.Д. Ковалёв // Энергия: экономика, техника, экология. – 2008. - № 10. – С. 21-25.

26. Панцхава Е.С. Отечественная биоэнергетика как элемент развития внутреннего рынка России // Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. - № 7. – С. 30-39.
27. Баадер В. Биогаз: теория и практика: Пер. с нем. / В. Бадер, Е. Доне, М. Бренндерфер – М.: Колос, 1982. – 148 с.
28. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких, Ю.Д. Арбузов, Г.А. Борисов и др. – СПб.: Наука, 2002. 314 с.
29. Воронин С.М. Возобновляемые источники энергии в автономных системах энергоснабжения сельских объектов. Монография. – зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2005. 118 с.
30. Животноводческие комплексы и охрана окружающей среды. /Ю.А. Ворошилов, С.Д. Дурдыбаев, Л.Н. Ербанова и др. – М.:Агропромиздат, 1991.- 272 с.
31. Шишкин Н.Д. Малые энергоэкономичные комплексы с возобновляемыми источниками энергии. – М., 2000. – 236 с.
32. Ильин А.К. Автономные теплоэнергетические комплексы (структура, характеристики, эффективность) / А.К. Ильин, Н.Д. Шишкин. – Ростов-на-Дону, 2004. 112 с.
33. Беляев Ю.М. Критерии эколого- экономической эффективности энергетических технологий / Ю.М. Беляев // Промышленная энергетика. – 2003. - № 8. – С. 39-44.
34. Иванов А.В. Организация обращения с твёрдыми бытовыми отходами (Российский и зарубежный опыт) / А. В. Иванов, Д.Г. Запорожский. – Калининград: КГТУ, 2007. – 434 с.
35. Рагулина И. Р. Биоэнергетический потенциал Калининградской области: автореф. дисс. Канд. геогр. наук: 25.00.36. – геоэкология / РГУ им. Канта, И.Р. Рагулина. – Калининград, 2007.-24 с.

36. Краснов Е.В. Экологические аспекты развития Калининградской энергетики / Е.В. Краснов, И.Р. Рагулина // Электрика. – 2006. - № 8. – С. 12-16.

37. Селин В.В. К вопросу о разработке концепции использования биотоплива в энергобалансе Калининградской области / В.В. Селин // Электрика. – 2006. - № 8. – С. 9-12.

38. Беркова Е.А. Разработка структурно-функциональных схем с использованием нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в автономных теплоэнергетических комплексах Калининградской области / Е.А.Беркова, В.В. Селин // Инновации в науке и образовании – 2007: труды V международной научной конференции, часть 2 / КГТУ. – Калининград, 2007. – С. 37-39.

39. Селин В.В. Отходы сельскохозяйственного производства как топливо для малой энергетики Калининградской области / В.В. Селин, Е.А. Беркова // Инновации в науке и образовании – 2011: труды IX международной научной конференции, часть 1 / КГТУ. – Калининград, 2011. – С. 396-399.

40. Селин В.В. Способы утилизации жидких и твёрдых отходов ЖКХ в биоэнергетических установках малой энергетики / В.В. Селин, Е.А. Беркова // Инновации в науке и образовании -2010: труды VIII международной научной конференции, посвящённой 80-летию образования университета, часть 2 / КГТУ. – Калининград, 2010. – С. 249-251.

41. Селин В.В. Место и роль малой энергетики в энергобалансе Калининградской области / В.В. Селин, Е.А. Беркова // Известия КГТУ. – 2010. - № 17. – С. 108-112.

42. Селин В.В. Анализ возможностей утилизации осадков сточных вод и городских бытовых отходов в биоэнергетических установках малой энергетики / В.В. Селин, Е.А. Беркова // Известия КГТУ. – 2010. № 18. – С. 138-143.

43. Селин В.В. Малая энергетика как инструмент для решения комплекса региональных проблем / В.В. Селин, Н.В. Жданова // Надёжность и эффективность технических систем: международный сборник научных трудов / КГТУ. – Калининград, 2008. – С. 143-152.

44. Беркова Е.А. Анализ возможностей малой энергетики в обеспечении энергетической безопасности Калининградской области / Е.А. Беркова // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CASL-технологии в энергетике: IV Всероссийская научно-техническая интернет-конференция: материалы / ПНИПУ. – Пермь, 2011. – С. 63-74.

45. Селин В.В. Комплексный подход к решению энергетических и экологических проблем региона / В.В. Селин// Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2012: труды X международной научной конференции, часть 2 / КГТУ. – Калининград, 2012. – С. 62-64.

46. Беркова Е.А. Анализ возможностей энергетического использования отходов птицефабрики в Калининградской области / Е.А. Беркова // Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2012: труды X международной научной конференции, часть 2 / КГТУ. – Калининград, 2012. – С. 56-58.

47. Селин В.В. Теплоэлектроцентральный синтез-газ для энергоснабжения посёлка и промышленного узла / В.В. Селин, Е.О. Федянина, В.С. Ясюк // Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2013: труды XI международной научной конференции, часть 1 / КГТУ. – Калининград. – 2013. С. 342-345.

48. Комплексные районные тепловые станции. Концепция. / В.Е. Накоряков, С.В. Алексеенко, А.С. Басин и др. – Новосибирск, 1996. – 15 с.

49. Попов Н.А. Организация сельскохозяйственного производства. – М.: Ассоциация авторов и издателей «ТАНДЕМ». Издательство «ЭКМОС», 1999. – 352 с.
50. Кеттлер Ш. Мусоросжигающая ТЭЦ в городе Бремерхафен / Ш. Кеттлер, Ф. Калетка // «Янтарьгосэнергонадзор». Информационно-аналитический сборник. – 2002. - № 1. С. 34-37.
51. Медведев Г. Применение парогазовой технологии на МСЗ Японии / Г. Медведев, О. Штык // Энергетика Балтики. – 2004. - № 8-9 (9-10). – С. 6-10.
52. Дёмина Л.А. Теплоэлектростанции на твёрдых бытовых отходах (европейский опыт) / Л.А. Дёмина // Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. - № 8. С. 23-29.
53. Тугов А.Н. Использование энергопотенциала твёрдых бытовых отходов в России и за рубежом / А.Н. Тугов, В.Ф. Москвичёв // Энергия: экономика, техника, экология. – 2011. № 8. – С. 32-42.
54. Экологически чистая технология завода по переработке ТБПО мощностью 60 тыс. т/год / В.Д. Ефименков, Е.М. Шелков, А.А. Авдеев и др. – М.: Национальный комитет экологической безопасности, НПЦ «ПОИСК – ПЛИС», 2001. 24 с.
55. Белей В.Ф. / Возобновляемые источники энергии и перспективы их использования в Калининградской области / В.Ф. Белей, В.В. Селин, В.Ф. Паршина // Известия КГТУ. – 2007. - № 11. С. 11 – 21.
56. Горбачёва Л.А. Зарубежный опыт мусоросжигания/ Л.А. Горбачёва // Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. № 7. С. 49 – 54.

9.6 Тема лекции 6: Технологии использования геотермальной энергии

СЕЛИН В.В.

9.6.1 Введение в лекцию

Тема знакомит с природой геотермальной энергии, плотностью её потока в различных районах земного шара, возможностями использования для получения тепловой энергии, электрической энергии и различных побочных коммерческих продуктов. Рассматриваются схемы генерации электроэнергии. Приводятся примеры действующих ГеоЭС. Рассматриваются экономические и экологические проблемы геотермальной энергетики.

9.6.2 Цель и основные результаты обучения

Целью обучения является изучение технологий использования геотермальной энергии для получения электрической и тепловой энергии, а также коммерческих продуктов из минеральных веществ, содержащихся в геотермальных флюидах. Результатами обучения могут являться:

- оценка экономической целесообразности использования региональных геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии;
- оценка экономической целесообразности использования региональных геотермальных ресурсов для использования в бальнеологии и в системах отопления и вентиляции,
- оценка возможностей использования региональных геотермальных ресурсов в системах теплонасосных установок;
- овладение методикой оценки теплового потенциала и постоянной времени геотермального массива.

9.6.3 Конспект лекции и раздаточные материалы

Все материалы и программное обеспечение лучших университетов мира с открытым кодом вы можете найти по ссылке: (http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU). Материал лекции включает в себя следующие разделы:

1. Классификация геотермальных районов.
2. Схемы генерации электроэнергии.
3. Комплексное использование геотермальных ресурсов.
4. Оценка тепловой мощности геотермального массива.
5. Экологические проблемы геотермальной энергетики.
6. Примеры действующих ГеоЭС в России и за рубежом.

Каждый раздел включает в себя различные наглядные пособия, раздаточный материал и программное обеспечение с открытым кодом.

9.6.3.1 Классификация геотермальных районов

В настоящее время установлено, что Земля имеет форму слегка сплюснутого с полюсов шара со средним радиусом 6378 км. Разница между экваториальным и полярным радиусами составляет 21 км. Поверхность Земли 510100935 км². Она состоит из ряда геосфер, отличающихся составом и состоянием вещества. Структура внутренних масс Земли показана на рисунке 9.6.3.1.

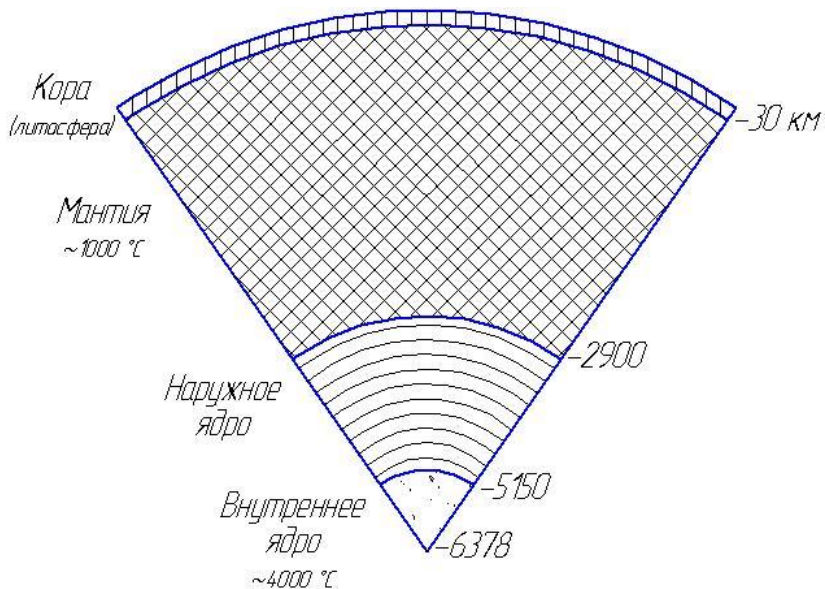


Рисунок 9.6.3.1. Структура внутренних масс Земли

Верхняя оболочка, называемая земной корой или литосферой, имеет глубину от 5 до 70 км. Наибольшая мощность этой оболочки отмечается на материках под горными хребтами. Под Атлантическим и Индийским океанами эта оболочка имеет мощность 10 – 15 км, а в центральной части Тихого океана всего 5 км. Средняя плотность литосферы составляет 2700 кг/м^3 и не превышает 3400 кг/м^3 .

Под верхней оболочкой до глубины 2850 – 2900 км находится промежуточная оболочка, которую называют мантией. Плотность вещества здесь увеличивается до $(4-6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а температура достигает примерно $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ниже промежуточной оболочки находится ядро Земли, в котором различают две части - наружное ядро и внутреннее. Полагают, что верхняя граница внутреннего ядра лежит на глубине около 5150 км. Плотность вещества ядра составляет $(6 - 12) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а температура в ядре планеты достигает $4000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Давление внутри Земли с глубиной возрастает очень быстро. На глубине 1 км оно равно 275 бар, на глубине 70 км -18900 бар, а в центре Земли достигает 4 млн. бар.

Земная кора состоит из огромных литосферных платформ, которые получают тепло в результате целого ряда причин: трения ядра; радиоактивного распада элементов (урана, тория и др.), химических реакций. При средних условиях температура пород на глубине 10 км достигает 300 °С.

Выход теплоты через твёрдые породы суши и океанского дна происходит главным образом путём теплопроводности (геотермальное тепло) и реже – в виде конвективных потоков расплавленной магмы или горячей воды (пара). Коэффициент теплопроводности пород равен примерно 2 Вт/(м·К). Здесь аккумулировано примерно 10^{20} Дж/км² геотермальной энергии. Средний поток геотермального тепла через земную поверхность составляет около 0,06 Вт/м² при температурном градиенте менее 30 °С/км. Суммарный поток всех других возобновляемых источников энергии в среднем составляет 500 Вт/м².

Качество геотермальной энергии (эксергия) обычно невысоко, поэтому лучше всего её использовать непосредственно для отопительных целей. Однако имеются районы с повышенными градиентами температуры, где потоки геотермальной энергии составляют 10-20 Вт/м², что позволяет реализовать геотермальные электрические станции (ГеоЭС) тепловой мощностью до 100 МВт/км² и продолжительностью срока эксплуатации не менее 20 лет.

По границам литосферных платформ наблюдается усиленное тепловое взаимодействие коры с мантией (сейсмическая активность, вулканы, фумаролы, горячие ключи, гейзеры). Потенциал энергии этих районов очень велик: горячая вода, пар. Температурные градиенты достигают 100°С/км. Наблюдаются повышенное давление

жидкости и повышенная концентрация растворённых в ней химических веществ (часто целебные источники). Глубоко залегающие зоны подогрева с помощью бурения могут обеспечить температуру флюидов от 50 до 200°C. Технология бурения скважин глубиной от 6 до 15 км освоена, так что проблема может считаться решённой. Освоен метод дробления скальных пород для обеспечения надёжного теплосъёма при закачке воды в скважины.

Геотермальную энергию лишь условно можно отнести непосредственно к возобновляемым источникам энергии, а именно ту её часть (горячие ключи, гейзеры), которая так или иначе рассеивается в окружающей среде. Ту же часть энергии, которую добывают через скважины из природных накопителей горячих вод или охлаждая горные породы, нельзя считать возобновляемой. Она близка по своей сути к ископаемым топливам.

Принято выделять три класса геотермальных районов:

1. Гипертермальный - с градиентами температур более 80 °C/км (вблизи границ платформ). Здесь находятся почти все из ныне действующих ГеоЭС в США, Италии, Никарагуа, Новой Зеландии, России (Камчатка, Курильские острова);

2. Полутермальный - с градиентами температур от 40 до 80 °C/км. Это аномалии в стороне от границ платформ (на Северном Кавказе, вблизи Парижа и др.). Здесь целесообразно извлекать тепло из естественных водоносных пластов для отопления, для использования в теплицах, для лечебных целей и т.п.

3. Нормальный - с градиентами температур менее 40 °C/км. Это наиболее распространённые районы с тепловыми потоками примерно 0,06 Вт/м² (в частности Калининградская область и страны Прибалтики). Экономическая выгодность извлечения тепла из недр здесь маловероятна, но есть перспектива использования его

в качестве источника для геотермальных теплонасосных установок (ТНУ).

9.6.3.2 Схемы генерации электроэнергии

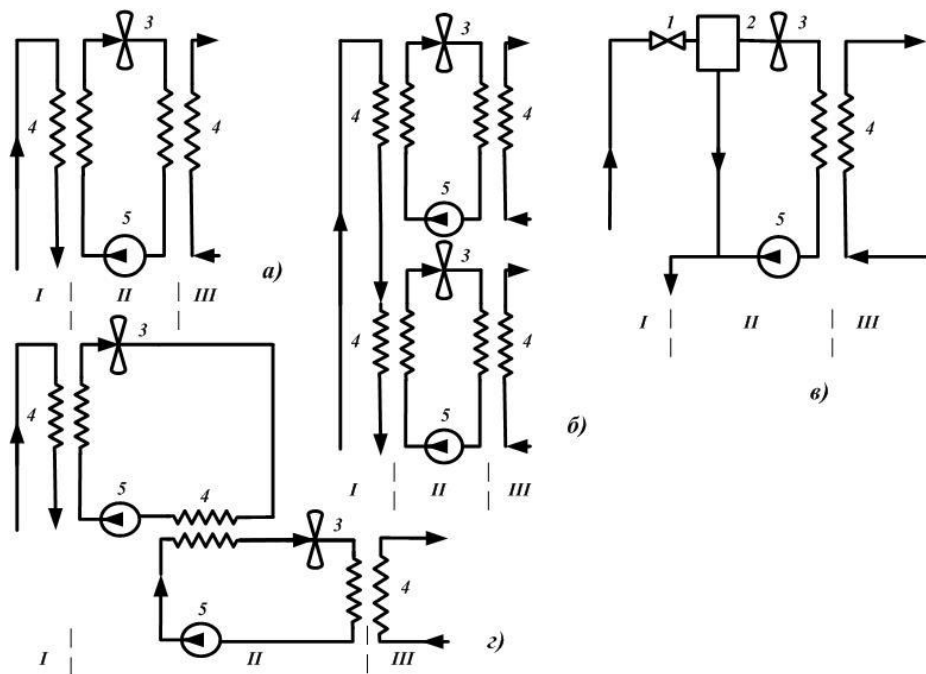
Несмотря на то, что в настоящее время общий вклад НВИЭ в производство электроэнергии в мире пока невелик (около 1 %), вклад геотермальной энергии в ряде стран достиг весомых величин - на Филиппинах до 21,5 %, в Сальвадоре и Кении до 20 % и т. д. В 2004 г. суммарная установленная электрическая мощность ГеоЭС в мире составляла 8785 МВт. За последние 30 лет ежегодный прирост мощностей составлял 7 %.

В сравнении с другими станциями на НВИЭ ГеоЭС имеют целый ряд преимуществ. Так, уступая ВЭС в суммарной эксплуатационной мощности (42 % против 52 %), они существенно превосходят их по выработке электроэнергии (70 % против 27 %). На ГеоЭС самый высокий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) - 90 %, что в 3-4 раза выше, чем на ВЭС, ПЭС и СЭС. Стоимость производимой на современных ГеоЭС электроэнергии в среднем на 30 %, 50 % и в несколько раз ниже, чем на ВЭС, ПЭС и СЭС соответственно.

Важнейшим экологическим преимуществом традиционных ГеоЭС по сравнению с электростанциями на органических видах топлива является значительное снижение выбросов ответственной за «парниковый эффект» двуокиси углерода и полное исключение выбросов CO₂ на современных ГеоЭС, использующих технологию обратной закачки отработавшего геотермального теплоносителя в георезервуар.

Несколько вариантов возможных схем ГеоЭС приведено на рисунке 9.6.3.2 (а, б, в, г):

а – цикл с одним рабочим телом (вода или фреон); б – цикл с двумя рабочими телами (вода и фреон); в – прямой паровой цикл; г – двухконтурный цикл. В каждой схеме действуют три контура циркуляции: геотермального источника (I), турбинного цикла (II), охлаждающей воды (III).



1 – редуктор, 2 – сепаратор, 3 – турбина, 4 – теплообменник, 5 – насос.

Рисунок 9.6.3.2. Варианты схем ГеоЭС

В России доля геотермальной электроэнергии в общем энергетическом балансе может составить 1 - 1,5 %. В то же время такие районы, как Камчатка, Курильские острова, ряд районов Северного Кавказа могут получать значительную часть электроэнергии за счёт геотермальных ресурсов.

9.6.3.3 Комплексное использование геотермальных ресурсов

Поскольку эксергия геотермальной энергии чаще всего невелика, то использование её для получения электроэнергии целесообразно лишь тогда, когда температура флюидов превышает 150 °С, что имеет место в гипертермальных районах. Что касается геотермальных вод, то их температура изменяется от 30 до 220 °С, а минерализация от 0,1 до 30 г/л. Поэтому основным направлением использования этих ресурсов является теплоснабжение жилищно-коммунальных, промышленных и сельскохозяйственных объектов. Кроме того, геотермальные воды можно использовать с целью извлечения из них ценных компонентов для различных технических целей, в бальнеологии, для розлива минеральных вод и т.д. Французские специалисты считают, что геотермальная вода с температурой более 30 °С уже является источником тепловой энергии.

На начало 2000 г. общая тепловая мощность геотермальных источников, которые использовались в мире в качестве термального теплоносителя (ГеоТТ), составляла 10052 МВт, причём 60 % из них приходилось на бальнеологию и 16 % - на отопление и горячее водоснабжение. 44 % утилизированного тепла принадлежало Японии. В Европе лидерами геотермального централизованного теплоснабжения являются Исландия, Франция и Италия. Что касается России, то по прогнозам возможная доля геотермальной энергии в системах централизованного теплоснабжения может составлять примерно 60 %.

В Исландии теплофикация её столицы Рейкьявика осуществляется централизованно от ГеоТТ с производительностью 30 Гкал/ч и на 99 % обеспечивает теплом и горячим водоснабжением 100 тыс. жителей. Для этого потребляется 2348 л/с геотермальной горячей воды с температурой от 86 до 127 °С. Схема теплоснабжения

включает в себя деаэратор, насосную станцию, аварийные (резервные) баки, пиковую котельную и разветвлённую сеть раздачи тепла. На станции работает всего 60 человек.

В последние годы в системах теплоснабжения многих стран стали широко использоваться тепловые насосы (ТН), предназначенные для передачи внутренней энергии от теплоносителя с низкой температурой к теплоносителю с высокой температурой. В качестве источника низкопотенциального тепла помимо геотермальной воды могут использоваться: внутренняя энергия окружающей среды, теплота грунта, вентиляционные выбросы, канализационные стоки, охлаждающая вода из конденсаторов паровых турбин и т.п. Наибольшее развитие эти технологии получили в США, Канаде, Швеции, Германии, Швейцарии и Австрии.

По тепловому потенциалу геотермальные воды делятся на следующие группы: перегретые (более 100 °C), высокотермальные (60 – 100 °C), термальные (40 – 60 °C), слаботермальные (до 40 °C).

По степени минерализации геотермальные воды подразделяются на пресные (до 1 г/л), слабосоленые (1 – 3 г/л), соленые (3 – 5 г/л), сильносоленые (5 – 10 г/л), слабосоленые (10 – 20 г/л), солёные (20 – 35 г/л), сильносолёные (35 – 50 г/л), слабые рассолы (50 – 75 г/л), рассолы (75 – 100 г/л), крепкие рассолы (более 100 г/л). Для нужд теплоэнергетики могут использоваться и высокоминерализованные воды, однако в каждом конкретном случае необходимо находить оптимальное технико-экономическое решение.

Улучшение технико-экономических показателей теплоэнергетического использования геотермальных вод требует применения различных технических приспособлений и агрегатов, использующих органическое топливо, электроэнергию, химические

вещества как в сфере получения этих вод, так и в сфере их использования и утилизации. К таким агрегатам относятся, например, котлы, теплообменники, артезианские и сетевые насосы, электродкотлы, тепловые насосы, холодильные машины. Поэтому для оценки того или иного решения по использованию энергии геотермальных вод используют эксергетический метод термодинамического анализа в соответствии со вторым законом термодинамики.

Геотермальные воды, используемые в теплоснабжении, можно условно разбить на три группы:

- геотермальные воды, которые могут непосредственно использоваться у потребителя и догреваться без каких-либо отрицательных последствий, т.е. воды наиболее высокого качества;
- геотермальные воды, которые могут непосредственно использоваться у потребителя на отопление, но не могут подвергаться нагреву из-за увеличения агрессивных свойств;
- геотермальные воды повышенной минерализации и агрессивности, которые нельзя использовать непосредственно у потребителя.

Практика показывает, что подавляющее число источников геотермальных вод относится ко второй и третьей группам. Поэтому в качестве примеров рассмотрим две возможные схемы теплоснабжения, которые могут быть применены при наличии геотермальных вод второй и третьей групп с температурой около 60°C, представленные на рисунке 9. 6.3.3 (а, б).

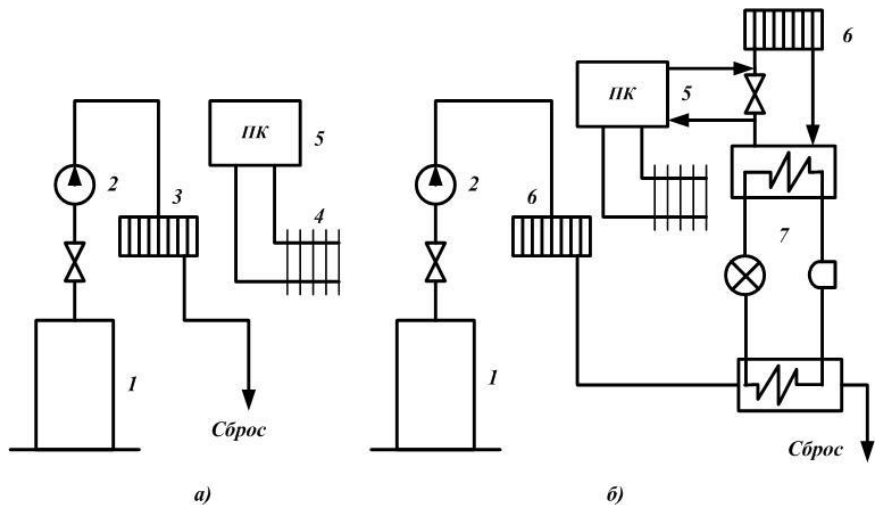


Рисунок 9.6.3.3. Схемы геотермального теплоснабжения для геотермальных вод второй и третьей групп

Поскольку непосредственный догрев геотермальной воды нежелателен, для повышения эффективности использования теплоты геотермальных вод можно использовать комбинированную схему теплоснабжения (рисунок 9.6.3.3а). В отапливаемых помещениях предполагается размещение двух типов отопительных систем: потолочно-напольной системы отопления на геотермальной воде и традиционной (например, с радиаторами) от пиковой котельной. Геотермальная вода из скважины 1 насосами 2 подаётся в систему отопления 3. В период понижения наружной температуры включаются традиционные отопительные приборы 4, работающие от котельной 5.

Однако, как в схемах чисто геотермального, так и в схемах комбинированного теплоснабжения даже при использовании потолочно-напольной системы отопления приходится сбрасывать воду с температурой 25 – 30 °С. Сбросную геотермальную воду можно утилизировать в тепловом насосе (рисунок 9.6.3.3б). Геотермальная вода из скважины 1 насосами 2 подаётся в систему

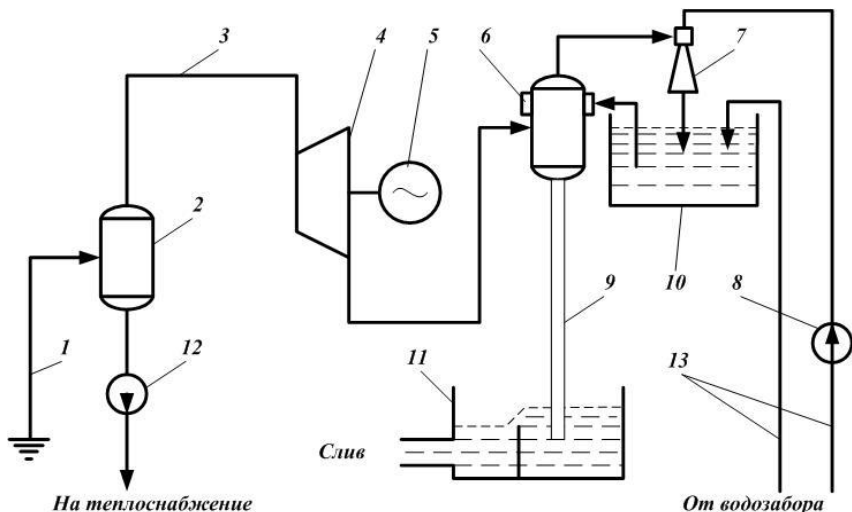
отопления 6 первого потребителя. После этой системы геотермальная вода подаётся в испаритель теплового насоса 7, конденсатор которого подключён к приборам отопления второго потребителя с пиковой котельной 5.

Наряду с ГеоЭС и ГеоТТ в современном мире широко практикуется принцип комплексного использования геотермальной энергии с одновременной выработкой электроэнергии и тепла на геотермальных тепловых электрических станциях (ГеоТЭС). На начало 2000 г. ГеоТЭС работали в 21 стране.

Ведущее место в мире по ГеоТЭС принадлежит США, на долю которых приходится 46 % действующих мощностей. В США все эти станции используют либо высокотемпературные термальные воды, либо сухой пар.

В качестве примера тепловой схемы ГеоТЭС можно привести схему первой очереди Паужетской геотермальной станции на Камчатке в России (рисунок 9.6.3.4). Пароводяная смесь из скважины 1 направляется в сепаратор 2, где происходит её разделение на пар и воду при давлении 1,5 бар. Пар направляется в паровую турбину 4, работающую на электрический генератор 5, а горячая вода с температурой 110 °С – в систему теплоснабжения посёлка.

Другим примером комплексного использования геотермальной энергии в России является ГеоТЭС в Краснодарском крае для локальной системы теплоэлектроснабжения г. Лабинска. Наряду с электроэнергией здесь тепловая энергия используется для теплоснабжения системы ЖКХ, обогрева теплиц, гостиничного комплекса, больницы, горячих плавательных и бальнеологических бассейнов, а также производственных нужд сахарного завода и других предприятий.



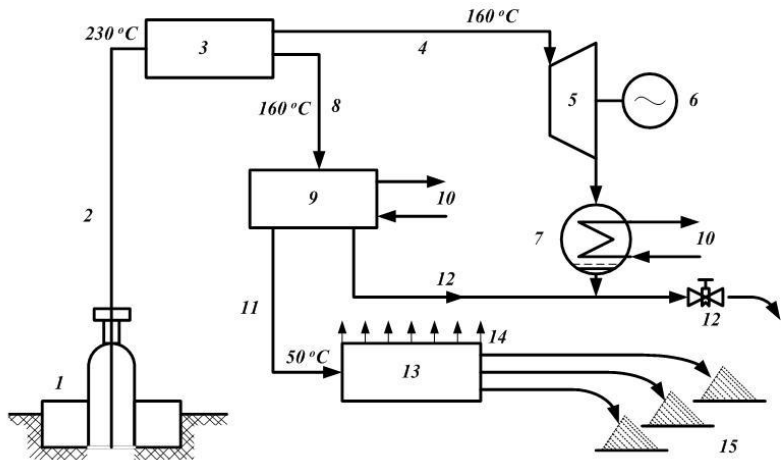
1 – скважина; 2 – сепаратор; 3 – паропровод; 4 – турбина; 5 – генератор; 6 – смешивающий конденсатор; 7 – водоструйный эжектор; 8 – эжекторный насос; 9 – барометрическая труба; 10 – бак охлаждающей воды; 11 – сливной колодец; 12 – насос горячей воды; 13 – трубопровод холодной воды.

Рисунок 9.6.3.4. Схема Паужетской геотермальной электростанции

Как уже отмечалось выше, себестоимость электроэнергии и удельные капитальные вложения на 1 кВт установленной мощности на ГеоЭС и ГеоТЭС на 30 – 50 % ниже, чем на любых других ЭС. Но особенно привлекательно многоцелевое использование геотермальных флюидов с получением ряда других коммерческих продуктов.

На рисунке 9.6.3.5 показана принципиальная схема такого использования флюидов с получением минеральных веществ из концентрированного рассола с помощью выпарных аппаратов и пресной воды в адиабатном испарителе мгновенного вскипания. Минерализованные воды содержат гамму ценных компонентов, из которых особый интерес представляют редкие и рассеянные элементы: литий, рубидий, стронций, цезий, йод, бром и др. Целесообразность получения ценного химического сырья из

термальных вод подтверждается длительной добычей его во многих странах.



1 – скважина; 2 – неразделённая смесь пара и горячей минерализованной воды; 3 – сепаратор; 4 – пар в турбину; 5 – турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – минерализованный рассол; 9 – многоступенчатый испаритель мгновенного вскипания (адиабатный); 10 – охлаждающая вода (от градирни, водохранилища и т. п.); 11 – концентрированный рассол; 12 – пресная вода; 13 – выпарные аппараты; 14 – испаряющаяся вода; 15 – минеральные вещества, извлекаемые из рассола.

Рисунок 9.6.3.5. Схема многоцелевого использования геотермальных флюидов

9.6.3.4 Оценка тепловой мощности геотермального массива

Бурение скважин для извлечения минерального рассола обходится дорого. Считается, что бурение на глубину более 2 км экономически оправдано, если температура пара (воды) будет более 150 °C. Продуктивность пробуренных скважин составляет примерно 1: 7. Тем не менее, прибыль от одной скважины способна оправдать шесть «пустых» скважин.

В настоящее время наиболее перспективной технологией для строительства ГеоТЭС считается создание подземных циркуляционных систем (ПЦС) с использованием теплоты «сухих» горных пород. Глубоко залегающие «сухие» горные породы могут обеспечить подогрев воды при её закачке через скважину до 50 – 220 °С. Технология бурения скважин глубиной от 6 до 15 км уже освоена. Освоен и метод дробления скальных пород путём гидравлического разрыва пласта для обеспечения надёжного теплосъёма при закачке воды в скважины. К началу 2000 г. в мире было пробурено более 1150 скважин глубиной более 1 км.

Если использовать «сухие» скальные породы, расположенные в толще земной коры сравнительно недалеко от поверхности, то можно определить энергетический потенциал массива E_0 в Дж между глубинами Z_1 и Z_2 для поперечного сечения F :

$$E_0 = \frac{\rho_{\text{гр}} \cdot c_{\text{гр}} \cdot F \cdot (z_2 - z_1)^2}{2} \left(\frac{dT}{dz} \right), \quad (9.6.3.1)$$

где: $\rho_{\text{гр}}$ – плотность скальных пород, кг/м³; $c_{\text{гр}}$ – удельная теплоёмкость скальных пород, Дж/(кг/К); F – поперечное сечение массива, м²; Z – глубина отметки, м; (dT/dZ) – температурный градиент, К/м; T_1 – минимальная полезная температура (на глубине Z_1), К; T_2 – температура на максимальной глубине Z_2 , К; T_0 – поверхностная температура, К.

Допустим, что теплота из пород извлекается с помощью потока воды равномерно, пропорционально средней температуре, превышающей T_1 на величину

$$\theta = 0,5 \cdot (T_2 - T_1) \quad (9.6.3.2)$$

В этом случае тепловой потенциал массива E по времени t будет изменяться по экспоненциальному закону:

$$E = E_0 \cdot e^{\frac{-\tau}{\tau_0}}, \quad (9.6.3.3)$$

где τ_0 – постоянная времени для данного массива, с (лет).

Если обозначить объёмный расход воды в м/с как V , плотность воды в кг/м³ как ρ_v , удельную теплоёмкость воды в Дж/(кг*К) как c_v , теплоёмкость всего массива в Дж/К как $C_{гр}$, то можно получить:

$$\tau_0 = \frac{C_{гр}}{V \cdot \rho_v \cdot c_v} \quad (9.6.3.4)$$

Здесь

$$C_{гр} = \rho_{гр} \cdot C_{гр} \cdot F \cdot (z_2 - z_1), \quad (9.6.3.5)$$

$$C_{гр} = 0,82 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг*К)}.$$

Определим тепловой потенциал естественного водоносного горизонта, когда источник тепла находится внутри слоя воды. В этом случае часть массива по объёму * занята порами, заполненными водой, а остальное пространство (1 - *) заполнено скальными породами с плотностью $\rho_{гр}$. Предположим, что толщина водоносного слоя h в м много меньше глубины его залегания Z , а температура всей массы жидкости T_2 . При задании минимальной температуры T_1

Тепловой потенциал горизонта в Дж определится как

$$E_0 = C_{пл} \cdot (T_2 - T_1), \quad (9.6.3.6)$$

где $C_{пл}$ – теплоёмкость пласта, Дж/К.

При поперечном сечении горизонта F в м²

$$C_{пл} = \alpha \cdot \rho_v \cdot c_v + (1 - \alpha) \cdot \rho_{гр} \cdot C_{гр} \cdot h \cdot F \quad (9.6.3.7)$$

Изменение теплового потенциала горизонта по времени также подчиняется экспоненциальному закону и определяется уравнением (9.6.3.3), а постоянная времени горизонта – уравнением (9.6.3.4).

9.6.3.5 Экологические проблемы геотермальной энергетики

Геотермальная энергетика, как и все другие способы преобразования энергии на основе ВИЭ, не является абсолютно чистой. При неправильном решении в геотермальной энергетике технических вопросов при её добыче, очистке, транспортировке и преобразовании может быть нанесён серьёзный ущерб природной среде. Рассмотрим основные причины возможных негативных последствий использования геотермальной энергии.

1. Изменение уровня грунтовых вод, оседание почвы, заболачивание, повышение сейсмической активности. Эти проблемы могут быть смягчены обратной закачкой рассола в геотермальный резервуар, но такое решение усложняет и удорожает установку.

2. Выброс в атмосферу газов, таких как метан, водород, азот, аммиак, сероводород, углекислый газ и др. На большинстве существующих ГеоЭС, расположенных в районах современного вулканизма, выброс сероводорода без специальных мер защиты может нанести серьёзный ущерб растительности. Так, на крупнейшей в США ГеоТЭС «Гейзеры» на 1 кВт*ч энергии выбрасывается 2,3 г H_2S . Путём очистки газов выброс сероводорода уменьшается до 0,2 г/кВт*ч, но установка удорожается на 20 %.

3. Сброс отравленных вод и конденсата, содержащих в небольших количествах такие вещества как аммиак, ртуть, кремнезём. Во многих случаях в этих водах могут находиться бор, мышьяк, фенолы, которые аккумулируются в рыбах. Стоки необходимо очищать. Практика показывает, что при очистке можно извлекать бор и получать товарную борную кислоту. Технология дефенолизации вод очень дорога.

4. Тепловое загрязнение атмосферы и связанная с ним проблема охлаждающей воды для конденсаторов турбин. Из-за более низкого КПД термодинамического цикла ГеоЭС в сравнении с ТЭС и

АЭС сброс тепла в окружающую среду соответственно выше. Выше и потребление охлаждающей воды. Однако в отличие от ТЭС и АЭС это не приводит к глобальному нарушению теплового равновесия, так как сброс тепла в атмосферу полностью компенсируется снижением геотермального теплового потока на всей площади геотермального месторождения. Кроме того, ГеоТЭС выбрасывает в атмосферу CO_2 на два порядка меньше и, тем самым, значительно меньше способствует проявлению парникового эффекта. Хотя кратность охлаждения на ГеоТЭС выше, чем на ТЭС и АЭС, на большинстве действующих ГеоТЭС применяется обратная система технического водоснабжения с подпиткой конденсатом. Это полностью исключает забор воды из окружающих водоёмов, что особенно важно для засушливых районов. Ещё одним вариантом решения этой проблемы является использование воздухоохлаждаемых конденсаторов поверхностного типа, что позволяет повысить экономичность ГеоЭС. В этом случае геотермальный пар после турбины конденсируется внутри оребрённых труб, охлаждаемых воздухом, а конденсат полностью закачивается в геотермальный резервуар.

1. Выброс тепла в атмосферу и в поверхностные воды нарушает тепловой режим водоёмов и наносит существенный вред рыбному хозяйству.

2. Возможное загрязнение подземных вод и водоносных слоёв, как при извлечении флюидов, так и при закачке рассола обратно.

3. Выбросы больших количеств рассола при разрыве трубопроводов в результате аварий.

4. Отчуждение земель для строительства ГеоЭС и систем геотермального теплоснабжения. Но оно вполне сопоставимо с современными ТЭС и АЭС.

9.6.3.6 Примеры действующих ГеоЭС в России и за рубежом

В настоящее время геотермальные ресурсы разведаны в 80 странах мира и в 58 из них активно используются, 27 из них используют геотермальное тепло для выработки электроэнергии. К 2005 г. суммарная установленная электрическая мощность ГеоЭС в мире составила величину порядка 8900 МВт, а годовая выработка электроэнергии 56800 ГВт·ч, что составляет 0,3 % от общей мировой выработки электроэнергии. За последние 30 лет ежегодный прирост мощностей был равен примерно 7 %.

Крупнейшим производителем геотермальной электроэнергии являются США, где геотермальная электроэнергетика, как один из альтернативных источников энергии, имеет особую поддержку правительства. В 2005 году в США на ГеоТЭС было выработано около 16 млрд. кВт·ч электроэнергии в таких основных промышленных зонах, как зона Больших гейзеров (1360 МВт установленной мощности), северная часть Солёного моря в центральной Калифорнии (570 МВт установленной мощности), Невада (235 МВт установленной мощности) и др.

Геотермальная энергетика бурно развивается также в ряде других стран, в том числе: на Филиппинах, где на ГеоТЭС на начало 2003 года было установлено 1930 МВт электрической мощности, что позволило обеспечить около 27 % потребностей страны в электроэнергии; в Италии, где в 2003 году действовали геотермальные установки общей мощностью в 790 МВт; в Исландии, где действуют пять теплофикационных ГеоТЭС общей электрической мощностью 420 МВт, вырабатывающие 26,5 % всей электроэнергии в стране; в Кении, где в 2005 году действовали три ГеоТЭС общей электрической мощностью в 160 МВт и были разработаны планы по доведению этих мощностей до 576 МВт.

Россия, наряду с огромными ресурсами органического топлива, располагает также значительными запасами тепла земли. Практически на всей её территории имеются геотермальные ресурсы с температурой от 40 до 300°C, имеющие практическое значение. Разведано 47 геотермальных месторождений с запасами термальных вод, которые позволяют получать более $240 \cdot 10^3$ м³/сутки и парогидротерм производительностью более $105 \cdot 10^3$ т/сутки.

Так, например, на Камчатке уже пробурено на геотермальных полях 365 скважин глубиной от 255 до 2266 м. Уже выявленные геотермальные ресурсы позволяют полностью обеспечить Камчатку электроэнергией и теплом более чем на 100 лет.

Наряду с высокотемпературным Мутновским месторождением электрической мощностью 300 МВт на юге Камчатки известны значительные запасы геотермальных ресурсов на Кошелевском, Больше-Банном, а также на севере Камчатки – Киреунском месторождениях. Всего месторождения обеспечивают около 2000 электрических МВт. Запасы геотермальных вод Камчатки оцениваются в 5000 тепловых МВт. Особый интерес сегодня представляет Верхне-Паратунское геотермальное месторождение (горячая вода с температурой 85 °C), которая позволяет полностью обеспечить теплом и горячей водой г. Елизово и его район.

Первой в России была построена Паужетская ГеоЭС, работающая по прямому циклу. Её мощность с 5 МВт в 1982 г. теперь увеличена до 11 МВт. Экологически чистая Верхне-Мутновская ГеоЭС была первым проектом, реализованным АО «Геотерм» в 1999 г. С 1999 г. по 2013 г. вступили в строй ещё несколько Мутновских ГеоЭС, общая установленная мощность которых достигла 300 МВт. Здесь используются как прямой, так и бинарный циклы.

Для повышения экономичности ГеоЭС были созданы Конденсационные турбины мощностью 4 МВт с воздушными

конденсаторами. Применение воздухоохлаждаемых конденсаторов поверхностного типа позволило создать экологически чистую ГеоЭС, в которой весь геотермальный теплоноситель, добытый из-под земли и отработавший в технологической схеме ГеоЭС (включая сепарат, конденсат пара и неконденсирующиеся газы), закачивается обратно в геотермальный резервуар.

Курильские острова располагают значительными запасами тепла земли, которых достаточно для их тепло- и электрообеспечения на 50 – 200 лет. Чукотка, Приморье, Прибайкалье, Западная Сибирь также располагают запасами геотермального тепла, пригодного для широкомасштабного использования тепла.

На Северном Кавказе уже много лет геотермальная вода с температурой от 70 до 180 °С используется для теплоснабжения и горячего водоснабжения. В Дагестане в 2000 г. было добыто более 6 млн. м³ геотермальной воды. Более 500 тыс. человек на Северном Кавказе используют геотермальную воду.

Наиболее перспективным направлением развития геотермальных электростанций является создание компактных (модульных) турбоустановок, которые поставляются на строительную площадку в собранном виде. Мощность таких конденсационных турбоустановок может достигать 25 МВт. Блочно-модульные ГеоЭС малой мощности были разработаны совместными усилиями специалистов АО КТЗ (Калужский турбинный завод), Научно-учебного центра МЭИ, АО «Наука», ВНИИАМ и других российских организаций.

По заданию АО «Интергеотерм» два турбоагрегата мощностью по 23 МВт каждый были изготовлены на АО КТЗ для ГеоЭС Сан-Хасинто в Никарагуа. При их создании учитывались новейшие технические достижения, а также многолетний опыт эксплуатации

турбин КТЗ на Паужетской ГеоЭС. На АО КТЗ разработаны и производятся также турбогенераторы с противодавлением для блочных ГеоЭС мощностью от 0,5 до 2,5 МВт.

Применение в бинарных циклах органических рабочих тел, не замерзающих при низких температурах, позволяет максимально использовать суровые климатические условия России для повышения термического КПД. В АО «Наука» разработан проект бинарной электрической станции, в которой для выработки электроэнергии может использоваться низкопотенциальное тепло различных источников (геотермальная вода, горячая вода системы теплоснабжения, сбросное тепло промышленных предприятий и другое).

9.6.4 Практические вопросы и решения

1. Дайте классификацию геотермальных районов земного шара.
2. При каких условиях целесообразно строить ГеоЭС?
3. К какому типу геотермальных районов относится Калининградская область?
4. Изобразите основные схемы генерации электроэнергии на ГеоЭС.
5. Нарисуйте схему комбинированного использования геотермальных флюидов.
6. По каким параметрам можно оценить тепловую мощность геотермального массива?
7. Что понимают под постоянной времени геотермального массива?
8. Перечислите основные экологические проблемы при использовании геотермальной энергии.

9. Приведите примеры использования геотермальных ресурсов в России и за рубежом.

Студент может найти вопросы для самоконтроля по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU.

9.6.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)

1. Ronald DiPippo. Geothermal Power Plants : Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, 2008

2. Harsh K. Gupta, Sukanta Roy. Geothermal Energy : An Alternative Resource for the 21st Century, 2007

3. Donal Blaise Lloyd. The Smart Guide to Geothermal : How to Harvest Earth's Free Energy for Heating & Cooling, 2011

4. J. O'M Bockris. Renewable Energies : Feasibility, Time and Cost Options, 2009

5. Roy L. Nersesian. Energy for the 21st Century : A Comprehensive Guide to Conventional and Alternative Sources, 2010

6. Martin Nicholson. Energy in Changing Climate, 2009

7. Andreas Poullikkas. Introduction to Power Generation Technologies, 2009

8. Dale R. Patrick, Steven R. Patrick. Energy Conservation Guidebook

9. W. Shepherd, D.W. Shepherd. Energy Studies, 2003

10. Paul A. Breeze. Power Generation Technologies, 2005

11. P.E. Hodgson. Energy, the Environment and Climate Change, 2010

12. Kendall F. Haven. Green Electricity : 25 Green Technologies That Will Electrify Your Future, 2011

13. Chih Wu. Thermodynamics and Heat Powered Cycles : A Cognitive Engineering Approach, 2007
14. Stan Kaplan. Power Plant Characteristics and Costs, 2010
15. Jakub Piotrowski, Leszek Kowalczyk. Energy Costs, International Developments and New Directions, 2009
16. John R.Fanchi, Christopher J.Fanchi. Energy in the 21st Century, 2011
17. Joseph B.Utrick. Energy and Buildings : Efficiency, Air Quality and Conservation, 2009
18. L.Zenfora. Encyclopedia of Energy Research and Policy, 2010
19. V. G.Cho, W. H.Lee. Handbook of Sustainable Energy, 2010
20. Stephen W.Fardo, Dale R.Patrick. Electrical Power Systems Technology, 2009
21. Вымооров Б.М. Геотермальные электростанции / Б.М. Вымооров. – М.: Энергия, 1966. – 112 с.
22. Геотермальное теплоснабжение. / А.Г.Гаджиев, Ю.И. Султанов, П.Н. Ригер и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
23. Берман З. Геотермальная энергия / З. Берман. – Мир, 1978. – 417 с.
24. Великанов Н.Л. Инженерные аспекты использования геотермальной энергии / Н.Л. Великанов. Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2007. - 39 с.
25. Поваров О.А. Развитие геотермальной энергетики в России и за рубежом / О А. Поваров, Г.В. Томаров // Малая энергетика. 2005. № 1-2. С. 84-98.
26. Поваров О.А. Использование геотермальной энергии – надёжный, дешёвый и экологически чистый способ производства электроэнергии и тепла / О.А. Поваров, О.М. Дубнов, А.И. Никольский // Теплоэнергетика. 2007. № 8. С. 12-16.

27. Использование тепла Земли для локального теплоснабжения / О. А. Поваров, Г.В. Томаров, А.И. Никольский и др. // Тяжёлое машиностроение. 2002. № 8. С. 1-5.

28. Поваров О.А., Никольский А.И. Опыт создания и эксплуатации геотермальных электростанций в условиях холодного климата // Новое в электроэнергетике России. Электронный журнал. 2005. № 9.

29. Бинарные электрические станции / О.А. Поваров, В.А. Саакян, А.И. Никольский и др. // Тяжёлое машиностроение. 2002. № 8. С. 13-15.

30. Верхнемутновская геотермальная электрическая станция / О.В. Бритвин, О.А. Поваров, Е.Ф. Клочков и др. // Теплоэнергетика. 1999. № 2. С. 2-9.

31. Сибикин Ю.Д. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: ИП РадиоСофт, 2009. – 232 с.

32. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких, Ю.Д. Арбузов, Г.А. Борисов и др. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.

33. Твайдел Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайдел, А. Уэйр. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.

34. Дэвинс Д. Энергия: Пер. с англ. / Д. Дэвинс. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.

35. Виссарионов В.И. Экологические аспекты возобновляемых источников энергии / В.И. Виссарионов, Л.А. Золотов. – М.: МЭИ, 1996. – 156 с.

36. Кириллин В.А. Энергетика. Главные проблемы (в вопросах и ответах) / В.А. Кириллин. – М.: Знание, 1990. – 120 с.

9.7 Тема лекции 7: Политические рамочные условия законодательств в области возобновляемой энергетики

ЕЛАГИН Н.Н.

9.7.1 Введение в лекцию

Тема знакомит с политическими рамочными условиями законодательств государств в области развития и поддержки возобновляемых источников энергии. Уделяется внимание вопросам нормативно-правовой базы, устойчивости тарифной политики, созданию благоприятного инвестиционного климата.

9.7.2 Цель и основные результаты обучения

Целью обучения по этой теме является знакомство с рамочными условиями нормативно-правовой базы различных стран, направленной на развитие и поддержку использования возобновляемой энергетики:

- анализ рамочных условий создания нормативно-правовой базы в области возобновляемой энергетики;
- исходные данные для анализа и выбора наиболее эффективных решений по внесению законодательных инициатив;
- пример, иллюстрирующий эффективность политики в области возобновляемой энергетики.

Предполагаемые основные результаты обучения соответствуют выше предусмотренным целям.

9.7.3 Конспект лекции и раздаточные материалы

Все материалы, видео, калькуляторы и программное обеспечение лучших университетов мира с открытым кодом вы можете найти по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU. Материал лекции включает в себя следующие разделы:

1. Экономические аспекты государственной политики в области возобновляемой энергетики.
2. Проблемы инвестиций в возобновляемую энергетику.
3. Инструменты государственной поддержки возобновляемой энергетики.

Каждый раздел состоит из различных материалов, видео, калькуляторов и программного обеспечения с открытым кодом.

9.7.3.1 Экономические аспекты государственной политики в области возобновляемой энергетики

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и их включение в систему энергообеспечения несет в себе значительные перспективы. Экологическая чистота, безопасность и неисчерпаемость ВИЭ делают их использование перспективным и выгодным. Использование ВИЭ в энергетике в качестве рационального подхода к использованию природных ресурсов позволяет, с одной стороны, добиться нового уровня энергоэффективности, а благодаря технологическим инновациям, с другой стороны, занять прочные рыночные позиции в инновационной экономике будущего. Данный подход в настоящее время успешно реализуется в мировой экономике и рассматривается как ключевая перспектива энергетического развития стран и регионов.

Согласно имеющимся данным мировыми лидерами в области возобновляемой энергетики являются Дания, Норвегия, Швеция и Германия, а сегодня и Китай.

Главными экономическими факторами и побудительными мотивами использования ВИЭ в странах мира, стимулирующими развитие рынка ВИЭ, являются:

- повышение цен на энергоносители;

- совершенствование технологий использования ВИЭ и, как следствие, снижение стоимости технологий;
- проблемы энергетической безопасности;
- возможность получения значительной прибыли;
- сокращение выброса парниковых газов в результате использования ВИЭ;
- создание дополнительных рабочих мест;
- экологические проблемы, связанные с использованием нефти и газа.

Полученный мировой опыт использования ВИЭ показывает весьма перспективный, рыночный сегмент. Предприятия, способные занять эту нишу, оказываются на динамично растущем рынке. Это дает значительный экономический эффект в виде развития бизнеса, создания новых рабочих мест, роста налоговых поступлений в бюджеты муниципалитета, региона, страны. Тенденция увеличения использования ВИЭ открывает хорошие перспективы и для российских производителей инновационной продукции: установок для выработки электроэнергии из ВИЭ, новых видов строительных материалов, технологий и проч.

Известны примеры, когда государства принимают меры, отодвигающие фактор общих затрат на выработку и приобретение энергоресурсов на второй план ради достижения целей экологичности, малой энергоемкости или собственной энергонезависимости.

Наиболее ярким примером может служить опыт Европейского союза в области развития отрасли альтернативной энергетики.

С 2008 г. в ЕС действует программа «20-20-20», обязывающая все страны ЕС увеличить к 2020 г. долю возобновляемой энергии в топливно-энергетическом балансе не менее чем до 20%. В Японии, США, Канаде и ряде других стран, в том числе и России, приняты

государственные программы по повышению энергоэффективности и увеличению доли ВИЭ в общем объеме.

Очевидно, что достижение целей в развитии альтернативной энергетики, поставленных перед правительствами стран ЕС также, как и в других странах, в том числе и в России, невозможно без хорошо продуманной и тщательно проработанной системы мер государственной поддержки.

9.7.3.2 Проблемы инвестиций в возобновляемую энергетику

Ориентируясь на опыт стран ЕС, используемые меры для стимулирования развития альтернативной энергетики можно разделить на две группы: *прямые и косвенные*. Если косвенные меры нацелены на улучшение условий в долгосрочной перспективе, то задачей прямых мер является незамедлительный эффект. В рамках указанной классификации меры также делятся на: *обязательные и добровольные*. Главной идеей последних является готовность потребителей платить больше за энергию, произведенную из возобновляемых источников. Другими важными критериями классификации является нацеленность применяемых мер на цену или количество, а также поддержку инвестиций или непосредственного производства альтернативной энергии.

Исходя из опыта ЕС все меры, в рамках выбранных программ, для решения проблем инвестиций в возобновляемую энергетику должны максимально отвечать определенным критериям, а именно:

- *долгосрочная перспектива и амбициозность* - чтобы убедиться в высоком уровне заинтересованности и безопасности инвесторов;

- *стабильность и постоянство* - политический инструмент должен оставаться активным достаточно долго для того, чтобы обеспечивать возможность и привлекательность устойчивого, долгосрочного планирования. Изменения в политических мерах

поддержки должны применяться только к новым проектам и должны быть объявлены заранее для того, чтобы дать проектам, которые находятся на стадии разработки, возможность надежного планирования, идеально отражающего наиболее характерное развитие проекта в период продолжительностью от одного года до четырех лет.

- *определенность в источниках финансирования.* Источниками финансирования вспомогательных мер могут быть: либо государственный бюджет, либо надбавки, заложенные в тарифы на потребляемую энергию. Преимущество последних в том, что меры поддержки менее подвержены ограничениям в бюджете. К примеру, фонды премиальных тарифов в Голландии финансируются правительством, когда как в Германии льготные тарифы оплачиваются потребителями электроэнергии.

- *длительность поддержки.* Длительность поддержки для отдельных проектов не должна быть неограниченной, и должна сводиться к срокам реализации проекта, чтобы избежать излишнего финансирования и стимулировать производителей к наиболее эффективному производству. Длительность поддержки также должна идеально отражать экономический период технологии, чтобы начать рефинансирование в более поздние сроки, которые значительно снижают затраты на финансирование.

Основными вспомогательными финансовыми инструментами, которые применяются в различных формах, являются: льготные и премиальные тарифы; квотирование и нормативы; тендерные системы; финансовые и другие вспомогательные льготы, такие как - поддержка прямого производства, инвестиционные дотации, кредиты с низкой процентной ставкой и различные виды мер в области налогообложения.

9.7.3.3 Инструменты государственной поддержки возобновляемой энергетики

Одним из основных инструментов поддержки развития производства энергии на основе ВИЭ является *тарифное регулирование* - комплекс обязательных мер, направленных на поддержание и увеличение производства энергии из возобновляемых источников. В рамках данного инструмента законодательно устанавливается цена за кВт/час, которую потребитель должен заплатить за потребляемую энергию, произведенную из возобновляемых источников. Такой тариф определяется для каждой технологии на длительный период времени (до 20 лет) исходя из специфики производства, чтобы учесть все затраты на производство возобновляемой энергии и гарантировать данному проекту прибыльность. В сочетании с гарантированным доступом к распределительным мощностям это ведет к минимизации инвестиционных рисков связанных с вложением денег в конкретный проект, поскольку инвестор выделяет деньги под установленную на длительный период цену реализации. Тарифы учитывают технологические особенности производства для того, чтобы предоставить относительно равные условия поддержки всем производителям и ликвидировать попытки производителей извлекать сверхприбыли за счет мер государственного стимулирования. Данные тарифы направлены на поддержку производителей ВЭ и обеспечение на начальных этапах необходимого для нормального функционирования и адаптации производства. Данный вид тарифов исключает возможность получения сверхприбыли от проектов с более благоприятным местоположением. Таким образом, делается ставка на формирование рыночных, конкурентоспособных механизмов производства возобновляемой энергии.

На практике, данный комплекс мер показал себя как наиболее эффективный, однако он не осуществим без соблюдения определенных условий:

- обязательное предоставление доступа всех производителей энергии из ВИЭ к распределительным мощностям, а также приоритет потребления альтернативной энергии над традиционной. Другими словами, сначала должна потребляться альтернативная энергия, а лишь потом традиционная. Это ведет к сокращению объемов производства традиционной энергии, а, следовательно, и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, а также дает инвесторам ВИЭ уверенность в том, что каждая единица произведенной альтернативной энергии будет продана.

- установление правильного фиксированного тарифа, который бы обеспечивал прибыльность технологии и достоверно отражал его затраты. Завышенный тариф приведет к неоправданным, чрезмерным прибылям, а заниженный - сведет на нет инвестиционную привлекательность.

- установление фиксированного тарифа на определенный период времени, что повышает инвестиционную привлекательность данных проектов. А ограниченность срока действия тарифа подталкивает производителей к инновациям, повышая тем самым общую эффективность производства альтернативной энергии.

Другим, не менее важным и существенным элементом государственной поддержки развития ВИЭ в ЕС является система квотирования с использованием «зеленых сертификатов». Производители энергии на основе возобновляемых источников получают специальные «зеленые» сертификаты, подтверждающие, что они произвели и продали на рынке определенный объем возобновляемой или «зеленой» энергии. Количество выпускаемых сертификатов привязано к объему произведенной генераторами

энергии. Обычно сертификаты кратны 1 МВт-часу. Однако движение сертификатов не привязано к движению энергии, на основании которой они выпускаются. Это дает возможность использовать сертификаты тем агентам, которые не производят энергию от ВИЭ, но покупают сертификаты для своих целей. Важно отметить, что сертификаты становятся предметом обращения на специальных рынках, получая свою рыночную цену.

«Зеленые» сертификаты по существу являются носителями определенных прав на возобновляемую энергию или самого главного ее «реквизита» - собственно возобновляемого характера произведенной энергии.

Вместе с тем, Европейская комиссия, основываясь на результатах реализации ранее принятых программ энергоэффективности, приняла новую программу государственной поддержки проектов в области энергетики окружающей среды, которая вступила в силу с 2014 года, Основная цель программы - постепенный перевод энергоресурсов на рыночные цены. Согласно новой программе начнется реализация конкурсных торгов на часть получаемой энергии из возобновляемых источников и проведение тендеров для поддержки внедрения всех новых объектов возобновляемой энергетики. Главное - наличие четкой цели проекта, уместности и потребности во вмешательстве государства.

В России схема с «надбавкой» к цене на электрическую энергию, полученную от ВИЭ, привязана к оптовому рынку электрической энергии. Она основана на «равновесной» цене оптового рынка электрической энергии и поэтому применима только в ценовых зонах оптового рынка, т.е. в тех частях оптового рынка, где электроэнергия продается по свободным рыночным ценам. Схема на базе платы за мощность также ограничена рамками оптового рынка. Поэтому на региональном уровне требуются дополнительные

механизмы для стимулирования ВИЭ, поставляющих электрическую энергию покупателям розничного рынка в ценовых зонах. Кроме того, необходимы специальные меры для поддержки ВИЭ, функционирующих в неценовых зонах оптового рынка или в изолированных энергорайонах.

Таким образом, государственная политика в сфере использования возобновляемых источников энергии основывается на следующих основных принципах:

- устойчивого развития и приоритетного, эффективного и рационального использования возобновляемых источников энергии;
- государственной поддержки и стимулирования использования возобновляемых источников энергии;
- обеспечения экологической и энергетической безопасности, охраны здоровья населения при использовании возобновляемых источников энергии;
- доступности информации в сфере использования возобновляемых источников энергии.

Государственное регулирование в сфере использования возобновляемых источников энергии осуществляется путем:

- определения и проведения единой государственной политики в сфере использования возобновляемых источников энергии;
- разработки государственных, отраслевых и региональных программ;
- создания системы финансово-экономических механизмов, обеспечивающих экономическую заинтересованность юридических и физических лиц, в использовании возобновляемых источников энергии, потреблении энергии, производимой из возобновляемых источников энергии;
- применения мер государственной поддержки развития генерации электрической энергии на основе использования

возобновляемых источников энергии до достижения реальной конкурентоспособности технологий использования возобновляемых источников энергии по отношению к технологиям получения энергии на основе ископаемых видов органического топлива;

- защиты производителей энергии из возобновляемых источников энергии от недобросовестной конкуренции, в том числе со стороны юридических лиц, занимающих доминирующее положение в сфере производства энергии;

- использования механизмов поддержки развития электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии для достижения необходимых темпов привлечения инвестиционных средств;

- содействия созданию и применению эффективных технологий и производству установок по использованию возобновляемых источников энергии;

- определения порядка подтверждения происхождения энергии, производимой из возобновляемых источников энергии, в том числе выдачи сертификата о подтверждении происхождения энергии.

- поддержки развития научно-технической базы и пропаганду научно-технических достижений;

- обеспечения доступности информации по вопросам формирования и осуществления мероприятий по реализации государственной политики в сфере повышения энергоэффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии;

- принятия мер, направленных на снижение воздействия на климат в целях выполнения обязательств по международным договорам в области охраны климата;

- обеспечения участия заинтересованных организаций в формировании государственной политики в сфере повышения

энергоэффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии и содействию в ее реализации.

9.7.4 Практические вопросы и решения

1. Какие критерии лежат в основе выработки государственной политики в области возобновляемой энергетики?

2. Как выбрать наиболее эффективное решение в развитии энергетики застроенной среды?

3. Примените на практике систему критериев оценки выбранного решения по поддержке и развитию возобновляемой энергетики:

- Выберите объект застроенной среды, на котором предполагается реализовать политику поддержки и развития возобновляемой энергетики;

- Оцените потенциал возобновляемых источников энергии;
- Сформулируйте альтернативные предложения;
- Установите критерии оценки альтернатив (количественные и качественные);

- Установите значимость критериев;
- Используя систему, предложите нормативно-правовые акты поддержки и развития возобновляемой энергетики и последовательность их принятия.

4. Используя поисковые системы интернета, проведите анализ политических аспектов деятельности различных государств в области развития и поддержки возобновляемых источников энергии. Установите преимущества и недостатки. Как бы Вы рекомендовали совершенствовать существующую законодательную базу?

Студент также может найти вопросы самоконтроля по видео (см.: электронные бизнес видео) и задачи, которые должны быть

решены с помощью калькуляторов (см.: электронные бизнес калькуляторы) по ссылке: http://www.klgtu.ru/CENEAST/Template_4_Module_Handbook_Renewable_energy_KSTU.

9.7.5 Рекомендуемая литература (интеллектуальная библиотека)

1. Akub Piotrowski, Leszek Kowalczyk. Energy Costs, International Developments and New Directions, 2009
2. John R. Fanchi, Christopher J. Fanchi. Energy in the 21st Century, 2011
3. David Jacobs. Renewable Energy Policy Convergence in the EU : The Evolution of Feed-in Tariffs in Germany, Spain and France, 2012
4. Stacy D. Van Deveer, Henrik Selin, Miranda A. Schreurs. Transatlantic Environment and Energy Politics : Comparative and International Perspectives, 2009
5. Bernadette M. Horton. The Role of Taxes in Energy Production and Conservation, 2010
6. Stephen Blank. Russo-Chinese Energy Relations : Politics in Command, 2006
7. Caitlin G. Elsworth. The Smart Grid and Electric Power Transmission, 2010
8. Irina Angelescu, Federiga M. Bindi. Frontiers of Europe : A Transatlantic Problem?, 2011
9. Margarita Mercedes Balmaceda. Belarus : Oil, Gas, Transit Pipelines and Russian Foreign Energy Policy, 2006
10. Yang Guang, Mehdi Parvizi Amineh. The Globalization of Energy : China and the European Union, 2010
11. Jakub Piotrowski, Kowalczyk Leszek. Energy Costs, International Developments and New Directions, 2009

12. Wilhelmina Maria Catharina Beerepoot. Energy Policy Instruments and Technical Change in the Residential Building Sector, 2007
13. Bernadette M. Horton. The Role of Taxes in Energy Production and Conservation, 2010
14. Woodrow W. Clark, Grant Cooke. Global Energy Innovation : Why America Must Lead, 2012
15. Roger H. Attenberg. Global Energy Security, 2009
16. Stephen A. Roosa. Sustainable Development Handbook, 2010
17. Danila Bochkarev. Russian Energy Policy During President Putin's Tenure : Trends and Strategies, 2006
18. Jan Martin Witte, Andreas Goldthau. Global Energy Governance : The New Rules of the Game, 2010
19. Gary C. Bryner, Robert J. Duffy. Integrating Climate, Energy, and Air Pollution Policies, 2012
20. John M. Deutch. The Crisis in Energy Policy, 2011

Справочное издание

**В.Ф. Белей, В.В. Селин, А.О. Задорожный, А.Ю. Никишин,
Н.Н. Елагин, А.И. Соловей**

Справочник модуля: Возобновляемые источники энергии

Под редакцией В.Ф. Белея, В.В. Селина, А.О. Задорожного,
А.Ю. Никишина, Н.Н. Елагина, А.И. Соловей.

Формат бумаги 60 × 90/16.

Тираж 200. Заказ № 10753

Типография ООО «ТЭСК»

236006 Россия, г. Калининград, ул. Больничная, 45

