

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»**

# **АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

**ПОСОБИЕ**

**для студентов специальности  
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2021**

УДК 621.311.2(075.8)  
ББК 31.15я73  
А58

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 8 от 25.06.2020 г.)*

Составитель *Т. Н. Никулина*

Рецензент: директор Института повышения квалификации и переподготовки  
канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжения» ГГТУ им. П. О. Сухого  
*Ю. Н. Колесник*

**Альтернативные источники энергии** : пособие для студентов специальности  
А58 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организацией» днев. и заоч.  
форм обучения / сост. Т. Н. Никулина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 94 с. –  
Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на  
HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа:  
<https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены вопросы использования энергии ветра, солнечной энергии, энергии биомассы,  
энергии океанов, геотермальной и гидроэнергии, а также технические устройства, использующие  
альтернативные источники энергии.

Для студентов специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования  
организаций».

**УДК 621.311.2(075.8)**  
**ББК 31.15я73**

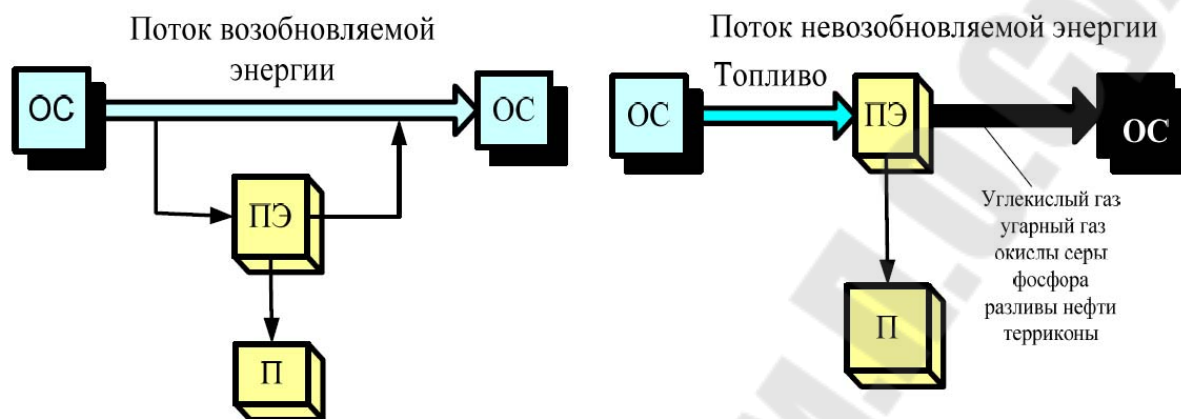
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2021

## 1. ПОНЯТИЕ О ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ И НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

**Возобновляемые** – это ресурсы, энергия которых непрерывно восстанавливается природой: энергия рек, морей, океанов, солнца, ветра, земных недр и т.п. Структурная схема их использования характеризуется рис.1.1. Возобновляемые источники энергии – находятся в окружающей среде в виде потоков энергии, с низкой эффективностью и плотностью около 0,3–0,5 кВт/м<sup>2</sup> и ниже. Их запасы неисчерпаемы и бесплатны. Стоимость оборудования высокая: для ветроэнергетики – 1 500–2 000 долл. за 1 кВт установленной мощности, для солнечной энергетики – до 1800–3900 долл./кВт, для небольших гидроэлектростанций до 7 000 долл. и более, для океанических тепловых электростанций – 40 000 долл. Выходная мощность – нестабильна. Возможность применения – в зависимости от местных условий. Экономичны небольшие системы. Во время работы есть опасные зоны. Влияние на окружающую среду небольшое. Эстетичны.

**Невозобновляемые** – это ресурсы, накопленные в природе ранее, в далекие геологические эпохи, и в новых геологических условиях практически не восполняемые (органические топлива: уголь, нефть, газ). К невозобновляемым энергоресурсам относится также ядерное топливо. Структурная схема использования НИЭ представлена на рис.1.1. Невозобновляемые традиционные источники энергии находятся в сосредоточенных месторождениях, существуют в виде связанной потенциальной энергии. Они имеют высокую интенсивность 100 кВт/м<sup>2</sup> и более. Их запасы истощаются, а стоимость возрастает. Стоимость оборудования высокая: 1 000 - 3 500 долл. за 1 кВт установленной мощности, для крупных гидроэлектростанций – до 3500 долл., для АЭС – 4 000 - 5 500 долл. Выходная мощность – стабильна. Использование без ограничений. Предпочтительны крупные системы. Применение – промышленность. Опасны – требуют специальных мер защиты. Зависят от поставок топлива. Загрязняют среду. При сжигании топлива в окружающую среду выделяются: углекислый газ, угарный газ, окислы серы, фосфора, разливы нефти, терриконы, которые являются причиной таких опасных явлений как парниковый эффект и кислотные дожди, не говоря уже о массовом отравлении населения, животного и растительного мира. Гидравлические электростанции, особенно

крупные, также экологически опасны: вызывают заливы территорий, изменение, чаще всего, ухудшение климата, потерю культурных земель, заболачивание, заиливание, ухудшение условий жизни людей, животных, рыбы. Борьба за ресурсы явилась причиной почти всех войн, особенно войн XX и XXI столетий.



*Рис. 1.1* Схемы потоков возобновляемой и невозобновляемой энергии: П – потребитель энергии; ПЭ – преобразователь энергии, энергоустановка; ОС – окружающая среда

Энергетика на ископаемом топливе (тепловые, конденсационные электрические станции, котельные) стала традиционной. Однако оценка запасов органического топлива на планете с учетом технических возможностей их добычи, темпов расходования в связи с ростом энергопотребления показывает ограниченность запасов. Особенно это касается нефти, газа, высококачественного угля, представляющих собой ценное химическое сырье, которое сжигать в качестве топлива нерационально и расточительно. Отрицательное влияние оказывает сжигание больших количеств топлива в традиционных энергетических установках на окружающую среду: загрязнение, изменение газового состава атмосферы, тепловое загрязнение водоемов, повышение радиоактивности в зонах ТЭС, общее изменение теплового баланса планеты.

Практически неисчерпаемы возможности ядерной и термоядерной энергетики, но с ней связаны проблемы теплового загрязнения планеты, хранения радиоактивных отходов, вероятных аварий энергетических гигантов.

В связи с этим во всем мире отмечается повышенный интерес к использованию нетрадиционных возобновляемых источников

энергии. Их природа определяется процессами на Солнце, в глубинах Земли, гравитационным взаимодействием Солнца, Земли и Луны. Установки, работающие на возобновляемых источниках, оказывают гораздо меньшее воздействие на окружающую среду, чем традиционные потоки энергии, естественно циркулирующие в окружающем пространстве. Экологическое воздействие энергоустановок на возобновляемых источниках в основном заключается в нарушении ими естественного ландшафта.

В настоящее время возобновляемые энергоресурсы используются незначительно. Их применение крайне заманчиво, многообещающе, но требует больших расходов на развитие соответствующей техники и технологий. При ориентации части энергетики на возобновляемые источники важно правильно оценить их долю, технически и экономически оправданную для применения. Эта задача – оценить, использовать потенциал возобновляемых ресурсов, найти их место в топливно-энергетическом комплексе – стоит перед экономикой Беларуси. Ее решение поможет смягчить дефицитность энергосистемы республики, позволит снизить зависимость от импорта энергоресурсов, будет способствовать стабильности экономики и политической независимости.

При планировании энергетики на возобновляемых источниках важно учесть их особенности по сравнению с традиционными невозобновляемыми. К ним относятся следующие.

1. Периодичность действия в зависимости от неуправляемых человеком природных закономерностей и, как следствие, колебания мощности возобновляемых источников от крайне нерегулярных, как у ветра, до строго регулярных, как у приливов.

2. Низкие, на несколько порядков ниже, чем у невозобновляемых источников (паровые котлы, ядерные реакторы), плотности потоков энергии и рассеянность их в пространстве. Поэтому энергоустановки на возобновляемых источниках эффективны при небольшой единичной мощности и прежде всего для малых районов.

3. Применение возобновляемых ресурсов эффективно лишь при комплексном подходе к ним. Например, отходы животноводства и растениеводства на агропромышленных предприятиях одновременно могут служить сырьем для производства метана, жидкого и твердого топлива, а также удобрений.

4. Экономическую целесообразность использования того или иного источника возобновляемой энергии следует определять в зависимости от природных условий, географических особенностей конкретного региона, с одной стороны, и в зависимости от потребностей в энергии для промышленного, сельскохозяйственного производства, бытовых нужд, с другой. Рекомендуется планировать энергетику на возобновляемых источниках для районов размером порядка 250 км.

При выборе источников энергии следует иметь в виду их качество. Последнее оценивается долей энергии источника, которая может быть превращена в механическую работу. Электроэнергия обладает высоким качеством. С помощью электродвигателя более 95% ее можно превратить в механическую работу. Качество тепловой энергии, получаемой в результате сжигания топлива на тепловых электростанциях, довольно низкое – около 40%.

Возобновляемые источники энергии по их качеству условно делят на три группы:

1. Источники механической энергии, обладающие довольно высоким качеством: – ветроустановки – порядка 30%, – гидроустановки – 60%, – волновые и приливные станции – 75%.

2. Источники тепловой энергии: прямое или рассеянное солнечное излучение, биотопливо

3. Источники энергии, использующие фотоэлектрические явления.

Основными нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии для Беларуси являются гидро-, ветроэнергетические, солнечная энергия, биомасса, твердые бытовые отходы.

### **1.1. Принципы и технические проблемы использования альтернативных источников энергии**

Решение об использовании возобновляемого источника энергии принимается на основании:

1) анализа работы существующей энергосистемы, потребляемого топлива, дефицита собственных традиционных энергоресурсов;

2) анализа потребителей энергии, их характеристик, мощности, сезонности потребления и т. д.;

3) анализа окружающей среды, наличия возобновляемых энергоресурсов, высокого потенциала энергии ветра или солнечной

энергии, или биомассы, временных характеристик, качества источника энергии;

4) предполагаемой производительности энергоустановок по электрической и тепловой энергии и окупаемости затрат. Согласование источников возобновляемой энергии и потребителей должно обеспечить максимально полное использование энергии возобновляемых источников. Для согласования источников (преобразователей) энергии и приемников используются:

- 1) схемы с отрицательной обратной связью (рис. 1.2, а);
- 2) схемы с накопителем энергии (рис. 1.2, б);
- 3) схемы с прямой связью между приемниками и преобразователем (рис. 1.3, а);
- 4) схемы с параллельным включением энергоустановки на возобновляемых источниках энергии с энергосистемой (рис. 1.3, б).

**Схема с отрицательной обратной связью (ООС)** между приемником (П) и преобразователем энергии (ПЭ) показана на рис. 1.2, а. В этой схеме излишек энергии, если он появляется, сбрасывается в окружающую среду (ОС). Использование таких систем должно быть минимальным, так как в окружающую среду сбрасывается уже выработанная энергия. Пример такой системы со сбросом излишков энергии – гидростанция со сбросом излишков воды, при котором обеспечивается постоянство напора на турбине. Схема применима для традиционных источников энергии (топливо), где позволяет реально экономить топливо.

**Схема с накопителем (Н) энергии** представлена на рис. 1.2, б. Энергия от преобразователя ПЭ поступает либо непосредственно к приемнику, либо к накопителю. По мере надобности накопленная энергия используется приемником. Система позволяет согласовать спрос и предложение энергии, не завышая мощность энергоустановки.

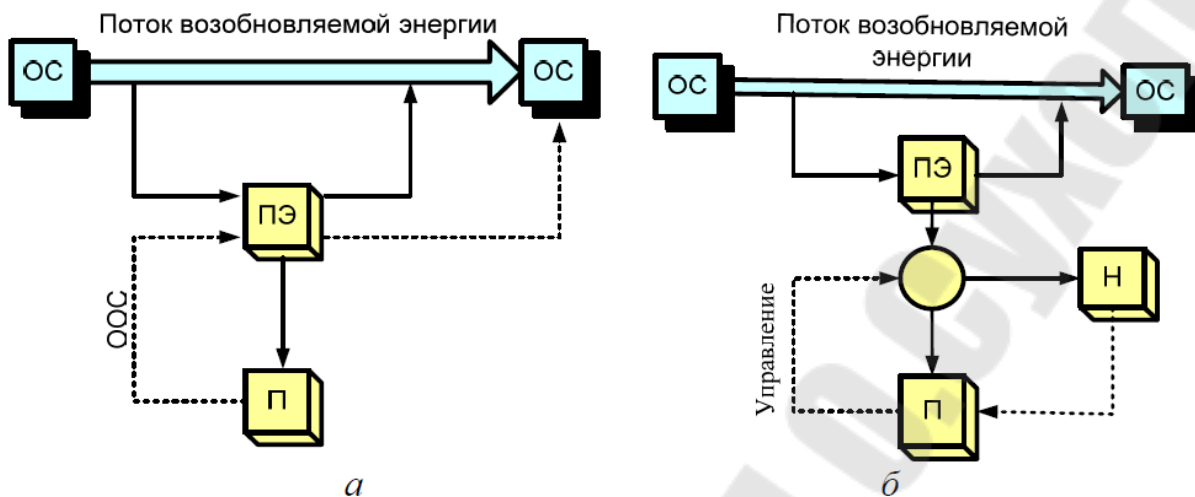


Рис. 1.2. Схема согласования источников энергии и приемников:  
 а – с отрицательной обратной связью ООС; б – с накопителем энергии; Н, П – потребитель энергии; ПЭ – преобразователь энергии, энергоустановка; ОС – окружающая среда

**Схема с прямой связью** между приемниками и преобразователем энергии, представлена на рис. 1.3, а. Это наиболее эффективная схема использования возобновляемого источника энергии, работающего автономно от энергосистемы. В ней к источнику энергии подключается столько потребителей П1, П2, П3, что их мощность равна мощности преобразователя ПЭ. В схеме сами потребители могут иметь собственные накопители и подстраиваться к изменяющимся параметрам источника. Это – система с регулированием нагрузки. Соответствие между спросом и предложением энергии обеспечивается включением – отключением необходимого числа потребителей с помощью автоматических выключателей В1, В2, В3. Управление осуществляется с помощью электронного распределительного устройства (ЭРУ), которое обеспечивает питание потребителей отключением необходимого числа потребителей. Преимущества такого регулятора: возможность подключения и отключения потребителей в соответствии с располагаемой мощностью и снижение потерь возобновляемой энергии; возможность учёта потребностей и приоритетов различных потребителей; возможность использования собственных аккумуляторов потребителями.

**Схема с параллельным включением** энергоустановок на возобновляемых источниках энергии с универсальной



энергосистемой (УЭС), рис. 1.3, б, применяется при значительной мощности энергоустановок и при их системном статусе, при высоком ветровом потенциале местности. Подключение установки к крупной универсальной энергосистеме на традиционных источниках энергии осуществляют также, если согласование энергоустановки на возобновляемых источниках энергии с потребителями затруднительно. Существенное значение для большой энергетики имеют именно эти системные установки.

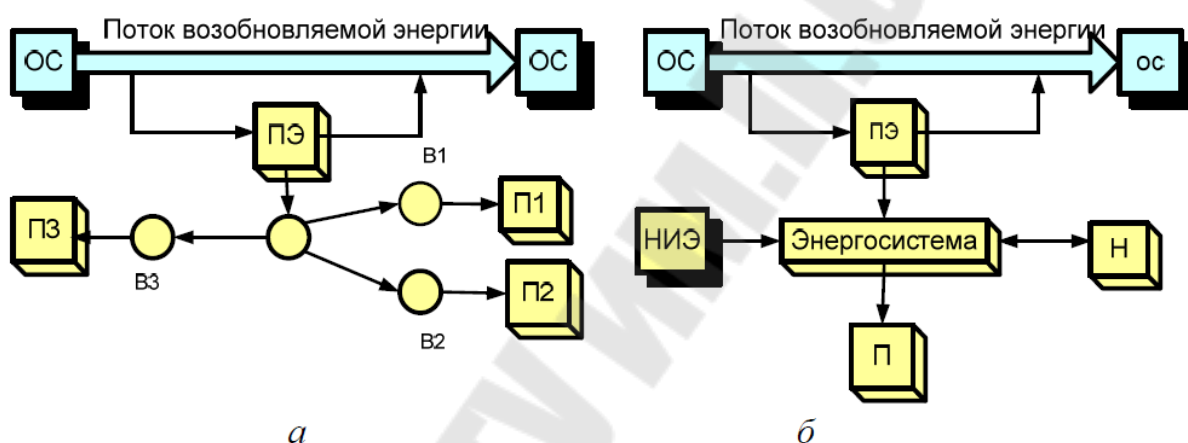


Рис. 1.3. Схема согласования источников энергии и приемников:  
 а – с прямой связью преобразователя и приемников;  
 б – с параллельным включением энергоустановки на ВИЭ с энергосистемой; П1, П2, П3 – потребители энергии

## 1.2. Энергетика Беларуси

Собственное потребление топлива Беларуси составляет 38–40 млн т у.т. Топливо расходуется на производство электроэнергии, отопление и технологический нагрев и на работу транспорта (табл. В4). На производство электроэнергии (и отпуск тепла ТЭЦ) расходуется 23,4 % этого топлива. Импортируемая электроэнергия эквивалентна еще 3,7 % общего расхода топлива. На отопление и технологический нагрев (без учета систем центрального отопления от ТЭЦ) расходуется 37,1 % всего потребляемого страной топлива, в том числе 7,3 % составляют традиционные местные энергоресурсы (дрова, торфобрикеты). И 35,9 % топлива расходуется транспортом, причем собственная нефть и производные виды топлива из этой

нефти (бензин, дизельное топливо) в энергетическом балансе страны составляют 6,4 %.

Таблица 1.1

**Собственное потребление основных энергоресурсов в  
Беларуси**

<b>Наименование</b>	<b>Млрд кВт·ч, млн Гкал, млн т</b>	<b>Потребление топлива, млн т у.т.</b>	<b>Потребление топлива, %</b>
Импортный газ на производство э/энергии, млрд кВт·ч	32,00	8,96	23,4
Импорт э/энергии, млрд кВт·ч	5,00	1,40	3,65
Импортный газ на отпуск теплоэнергии ТЭЦ (за счет топлива на производство электроэнергии), млн Гкал	7,00		
Торф, дрова на отопление, млн т		2,80	7,31
Мазут, уголь на отопление		1,80	4,70
Импортный газ на отопление, технологическое тепло, сырье, млн т		12,07	31,50
Импортная нефть и нефтепродукты из импортной нефти, млн т		11,29	29,46
Собственная нефть и нефтепродукты из собственной нефти, млн т		2,46	6,42
Собственное потребление топлива, млн т у.т.		38,32	100,00

Потребление электроэнергии в Беларуси составляет 35–37 млрд кВт·ч в год, собственное производство электроэнергии за счет импортного газа – 30–32 млрд кВт·ч, импорт электроэнергии – 2–5 млрд кВт·ч. Производство электроэнергии за счет собственных энергоресурсов составляет: за счет гидроэнергии рек – 0,3 %, энергии ветра – 0,02 %, энергии редуцирования газа в турбодетандерных энергоустановках – 0,2 %, за счет энергии биогаза в биогазогенераторных комплексах – 0,1 %.

Мощность электростанций превышает 8 000 МВт, в том числе:  
– конденсационные тепловые электростанции: Березовская 1 060 МВт и Лукомльская 2 412 МВт;

– крупнейшие теплофикационные электростанции (ТЭЦ):

Минская ТЭЦ-4 1035 МВт,

Гомельская ТЭЦ-2 540 МВт

Новополоцкая ТЭЦ 505 МВт

Минская ТЭЦ-3 370 МВт

Могилевская ТЭЦ-2 345 МВт

Минская ТЭЦ-5 320 МВт

Светлогорская ТЭЦ 215 МВт

Мозырская ТЭЦ 195 МВт

Расходная часть электроэнергетического баланса Беларуси: промышленность – 60 %, непромышленные потребители – 10 %, население – 20 %, транспорт – 4 %, сельское хозяйство – 6 %. Отпуск тепла составляет 35,4 млн Гкал. Беларусь обладает значительными возобновляемыми энергетическими ресурсами [1]. Энергия ветра является важнейшим возобновляемым источником энергии. Другие источники: биомасса, гидроэнергия рек, солнечная энергия – менее значительны или менее интенсивны, или их использование связано с нарушением экологии. Извлечение энергии биомассы и местных видов топлива сопровождается сжиганием отходов или производного биогаза и загрязнением атмосферы. Извлечение гидроэнергии рек сопровождается заливом и потерей значительных территорий, нарушением экологии и условий жизни, непредсказуемым влиянием на подземные воды, что ограничивает возможности гидроэнергетики. Солнечная энергия здесь – значительно менее интенсивна.

Необходимость освоения альтернативных источников энергии в Беларуси обусловлена в первую очередь проблемами энергетической безопасности страны, снижением зависимости от импорта

энергоносителей (особенно нефти и газа) при дефиците собственных качественных энергоресурсов.

Для получения полной и достоверной информации о развитии альтернативных источников энергии в нашей стране создан **единый государственный кадастр ВИЭ**. В данном кадастре внесены все действующие альтернативные источники энергии в Беларуси (рис. 1.4). Кадастр постоянно обновляется, юридические лица и индивидуальные предприниматели также могут вносить информацию о вновь вводимых объектах, использующих возобновляемые источники.

Кроме этого, можно получить информацию:

- о площадках пригодных для размещения ВИЭ;
- о потенциале Республики Беларусь в области возобновляемой энергии;
- о действующих нормативно-правовых актах в области ВИЭ;
- о максимально возможной выработке электрической и тепловой энергии посредством ВИЭ;
- о картографических и гидрометеорологических данных;
- получить сертификат о подтверждении происхождения энергии.

Ознакомиться с кадастром можно на сайте [Министерства природных ресурсов и окружающей среды РБ](#).

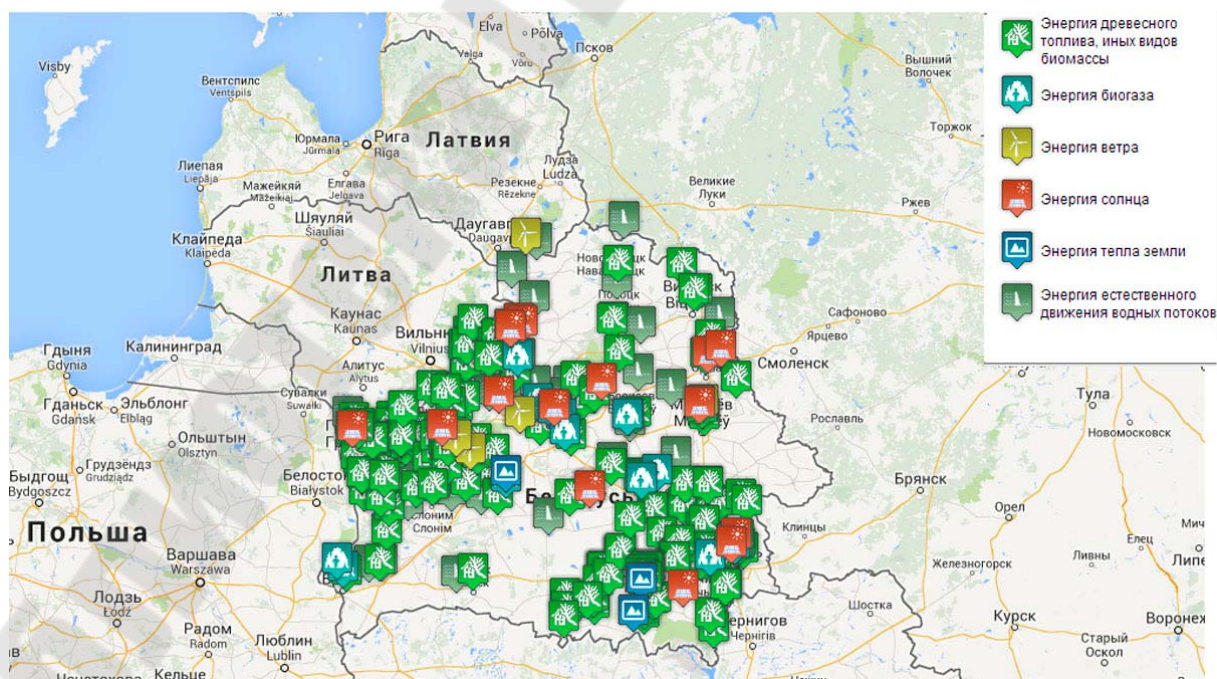


Рис. 1.4. Действующие альтернативные источники энергии в Беларуси

## 2. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

### 2.1. Происхождение ветра, ветровые зоны РФ

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание солнцем земной поверхности. Земная поверхность неоднородна: суша, океаны, горы, леса обуславливают различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений. На экваторе у земной поверхности лежит зона затишья со слабыми переменными ветрами. На север и на юг от зоны затишья расположены зоны пассатов, которые вследствие вращения Земли с запада на восток имеют отклонение на запад. Таким образом, в северном полушарии постоянные ветры приходят с северо-востока, в южном – с юго-востока, как показано на схеме рис.2.1.

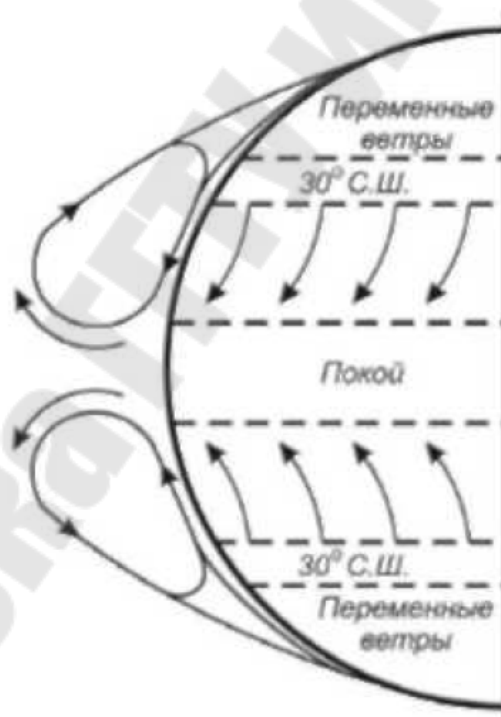


Рис. 2.1. Схема общей циркуляции земной атмосферы

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

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

В субтропических широтах в поясах высокого давления зоны пассатов сменяются штилевыми областями. В этих широтах, кроме того, в атмосфере непрерывно возникают и затухают вихревые движения, усложняющие простую схему общей циркуляции атмосферы, показанную на рис. 2.1.

Местные ветры. Особые местные условия рельефа земной поверхности (моря, горы и т. п.) вызывают местные ветры.

Бризы. Вследствие изменения температур днём и ночью возникают береговые морские ветры, которые называются бризами.

Днём при солнечной погоде суша нагревается сильнее, чем поверхность моря, поэтому нагретый воздух становится менее плотным и поднимается вверх. Вместе с этим более холодный морской воздух устремляется на сушу, образуя морской береговой ветер. Поднимающийся над сушей воздух течёт в верхнем слое в сторону моря и на некотором расстоянии от берега опускается вниз.

Таким образом, возникает циркуляция воздуха с направлением внизу – на берег моря, вверху – от суши к морю. Ночью над сушей воздух охлаждается сильнее, чем над морем, поэтому направление циркуляции изменяется: внизу воздух течёт на море, а вверху – с моря на сушу. Зона распространения бриза около 40 км в сторону моря и 40 км – в сторону суши. Высота распространения бризов в наших широтах достигает от 200 до 300 м.

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

Сильные муссоны можно наблюдать на южном побережье Азии в Индийском океане и Аравийском море, где летом они имеют юго-западное направление, а зимой – северо-восточное.

Различные зоны страны имеют ветровые режимы, сильно отличающиеся один от другого. Значение среднегодовой скорости ветра в данном районе дает все же возможность приблизительно судить о целесообразности использования ветродвигателя и об эффективности агрегата.

Среднегодовая скорость фонового ветра в РБ колеблется от 3 до 4 м/с на высоте 10 - 12 метров. Поэтому существует необходимость тщательного технико-экономического обоснования строительства

ветроустановок в каждом отдельном случае. Распределение расчетной скорости ветра на уровне 60 м в Беларуси можно посмотреть на рис. 2.2.

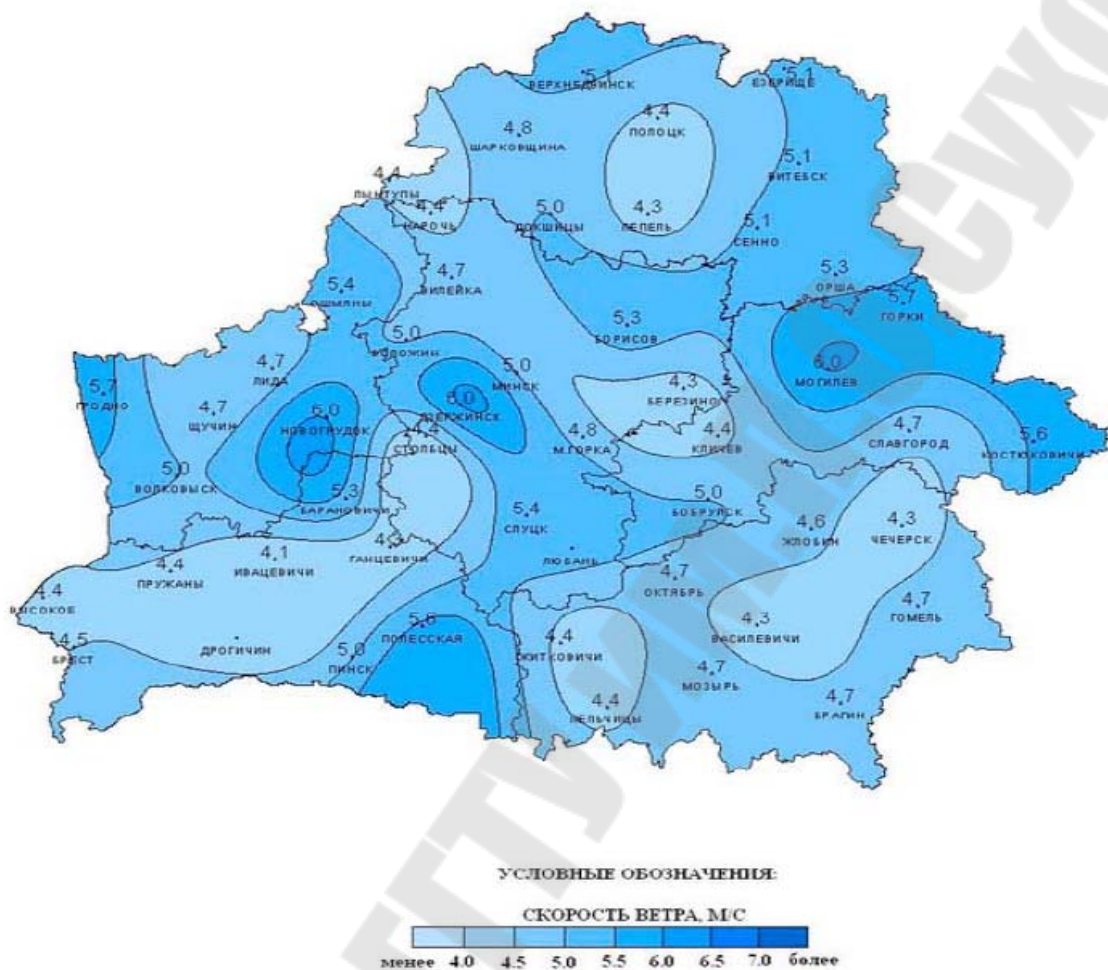


Рис. 2.2. Распределение расчетной скорости ветра

## 2.2 Запасы энергии ветра и возможности ее использования

Энергия ветра – это преобразованная энергия солнечного излучения, и пока светит Солнце будут дуть и ветры. Таким образом, ветер – это тоже возобновляемый источник энергии.

Ветроэнергетика является сложившимся направлением энергетики. Производятся и работают ветроэнергетические установки (ВЭУ) от нескольких сотен ватт до тысяч киловатт. Большая часть установок используется для производства электроэнергии – в энергосистеме или автономно.

Максимальная проектная мощность ВЭУ определяется для некоторой стандартной расчетной скорости ветра в пределах от 7 до 15 м/с. Мощность, снимаемая с 1 м<sup>2</sup> ометаемой площади ветроколеса, равна 0,3–0,4 кВт. В районах с благоприятными ветровыми

условиями среднегодовое производство электроэнергии составляет 25–35 % его максимального проектного значение. Срок службы ветрогенераторов 20–25 лет, а их стоимость с учетом затрат на инфраструктуру, на выполнение монтажных работ и доставку составляет 1 500–2 000 долл. за 1 кВт установленной мощности. В ветроэнергетике районы со среднегодовой скоростью ветра менее 5 м/с считаются малопригодными для размещения ВЭУ, а со скоростью более 8 м/с – очень хорошими.

Скорость ветра оценивают по 12-бальной шкале Бофорта:

0 баллов – 0–0,4 м/с – штиль (условия для работы ВЭУ отсутствуют);

1 балл – 0,4–1,8 м/с – тихий ветер;

2 балла – 1,8–3,6 м/с – легкий ветер;

3 балла – 3,6–5,8 м/с – слабый ветер (начинают вращаться тихоходные ветроколеса и колеса ВЭС);

4 балла – 5,8–8,5 м/с – умеренный ветер;

5 баллов – 8,5–11 м/с – свежий ветер (мощность ВЭУ достигает 30 % проектной);

6 баллов – 11–14 м/с – сильный ветер (мощность ВЭУ равна номинальной);

7 баллов – 14–17 м/с – крепкий ветер (ВЭУ развивают номинальную мощность);

8 баллов – 17–21 м/с – очень крепкий ветер (ВЭУ начинают отключаться, условия работы для них – предельно допустимые);

9 баллов – 21–25 м/с – шторм – (все ВЭУ отключаются, устанавливаются в нерабочее положение, возникают небольшие разрушения);

10 баллов – 25–29 м/с – сильный шторм (возникают значительные разрушения, деревья вырываются с корнем);

11 баллов – 29–34 м/с – жестокий шторм (возникают широкомасштабные разрушения, возможно повреждение некоторых ВЭУ);

12 баллов – более 34 м/с – ураган (происходят опустошительные разрушения, серьезные повреждения ВЭУ вплоть до разрушения).

Одно из основных условий при проектировании ветровых установок – обеспечение их защиты от разрушения очень сильными порывами ветра. Ветровые нагрузки пропорциональны квадрату скорости ветра, а раз в 50 лет бывают ветры со скоростью, в 5...10 раз превышающей среднюю, поэтому установки приходится



проектировать с большим запасом прочности. Кроме того, скорость ветра очень колеблется во времени, что может привести к усталостным разрушениям, а для лопастей к тому же существенны переменные гравитационные нагрузки.

Скорость ветров увеличивается с высотой, а их горизонтальная составляющая значительно больше вертикальной. Последнее обстоятельство является основной причиной возникновения резких порывов ветра и некоторых других мелкомасштабных явлений.

Потенциал атмосферы можно вычислить, зная ее массу и скорость рассеяния энергии. Для приземного слоя толщиной в 500 метров энергия ветра, превращающаяся тепло, составляет примерно 82 трлн кВт·ч в год. Всю ее использовать невозможно, в частности, по той причине, что часто поставленные ветряки будут затенять друг друга.

Среднегодовые скорости воздушных потоков на стометровой высоте превышают 7 м/с. Если выйти на высоту в 100 м и поставить установки на 100 км<sup>2</sup>, то при установленной мощности около 2 млрд кВт можно выработать за год 5 трлн кВт·ч.

Достоверно оценить, какая доля энергии ветра может быть использована вряд ли возможно, так как эта оценка очень сильно зависит от уровня развития ветроэнергетики и ее потребителей. Тем не менее, официальные оценки возможной доли ветроэнергетики в энергетике в целом, например в Великобритании и Германии, не предполагающие каких-либо серьезных изменений в сложившейся инфраструктуре энергопотребления, дают не менее 20 %.

При определенных изменениях инфраструктуры доля ветроэнергетики может быть существенно большей. Автономные ветровые энергоустановки весьма перспективны для вытеснения дизельных электростанций и отопительных установок, работающих на нефтепродуктах, особенно в отдаленных районах и на островах.

### 2.3. Классификация ветроэнергетических установок

**Ветроустановки** – это преобразователи частоты кинетической энергии ветра в электрическую или механическую, удобную для практического использования. Энергия механического типа используется преимущественно в сельской местности для подъема воды. Электрическая энергия производится для промышленных и бытовых нужд.

*По мощности:* малые мощностью до 25 кВт, диаметром ветроколеса до 10 м; средние – до 150 кВт и до 25 м; большие – до 1 000 кВт и до 64 м; очень большие – до 4 000 кВт и до 130 м.

*По взаимному положению оси ветроколеса и направлению воздушного потока (рис. 2.3):* горизонтально-осевые (ветродвигатели с горизонтальной осью вращения (крыльчатые) (2...5)) и вертикально-осевые (ветродвигатели с вертикальной осью вращения (карусельные: лопастные (1) и ортогональные (6)). Наиболее популярны в мире ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения ротора, когда эта ось располагается параллельно земной поверхности. Лопасти турбины ветрогенератора с вертикальной осью вращения, вращаются в плоскости, перпендикулярной, плоскости земной поверхности.

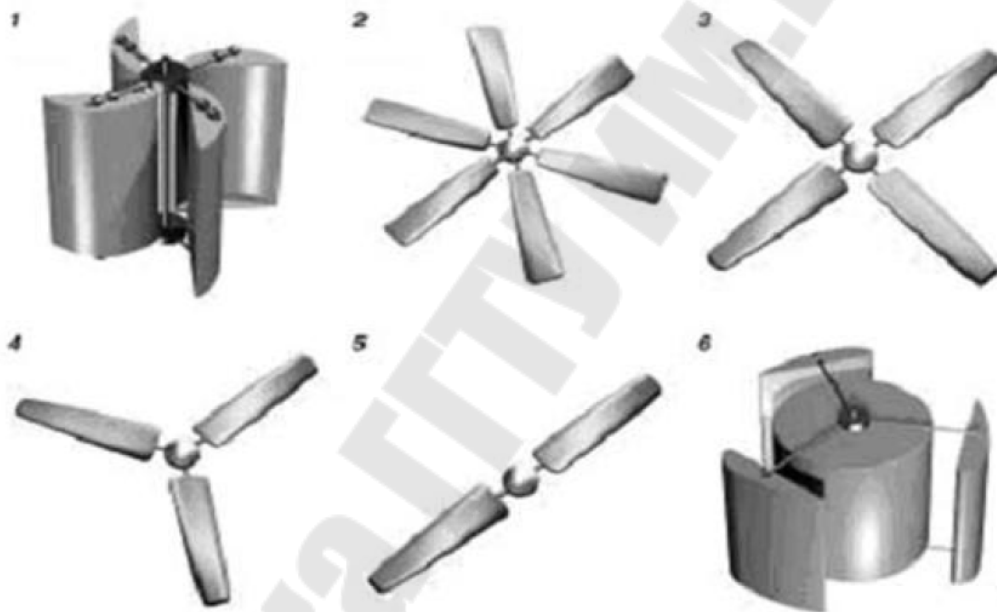


Рис.2.3. Типы ветродвигателей

*По вращающей силе:* установки, использующие силу сопротивления, и установки, использующие подъемную силу. Линейная скорость первых ниже скорости ветра, линейная скорость вторых – может быть выше скорости ветра.

*По геометрическому заполнению ветроколеса:* двух-, трех-, многолопастные. Установки с большим геометрическим заполнением – многолопастные – развивают значительную мощность при слабом ветре. Установки с малым заполнением достигают максимальной мощности при больших оборотах и дольше выходят на режим. Поэтому первые используют в качестве насосов. Они работоспособны

даже при слабом ветре. Вторые – в качестве электрогенераторов, где требуется высокая частота вращения.

*По назначению:* ветряные мельницы (для непосредственного выполнения механической работы) и ветроэлектрогенераторы (для производства электроэнергии).

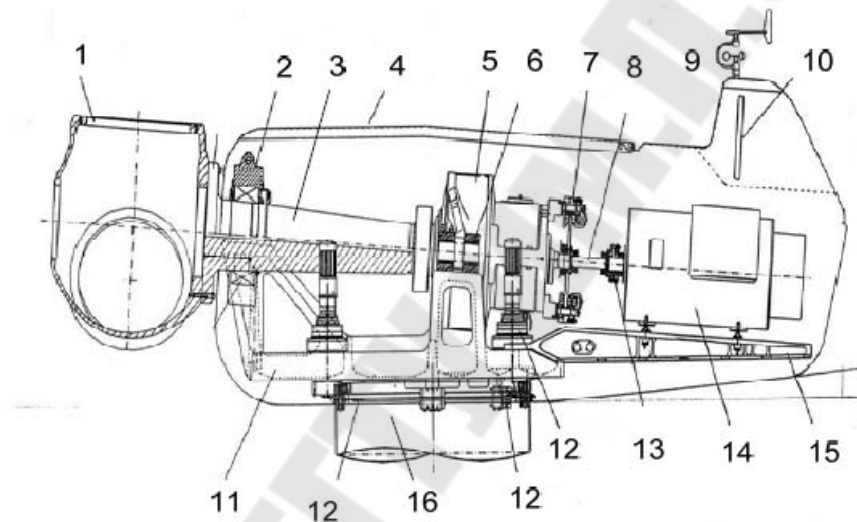
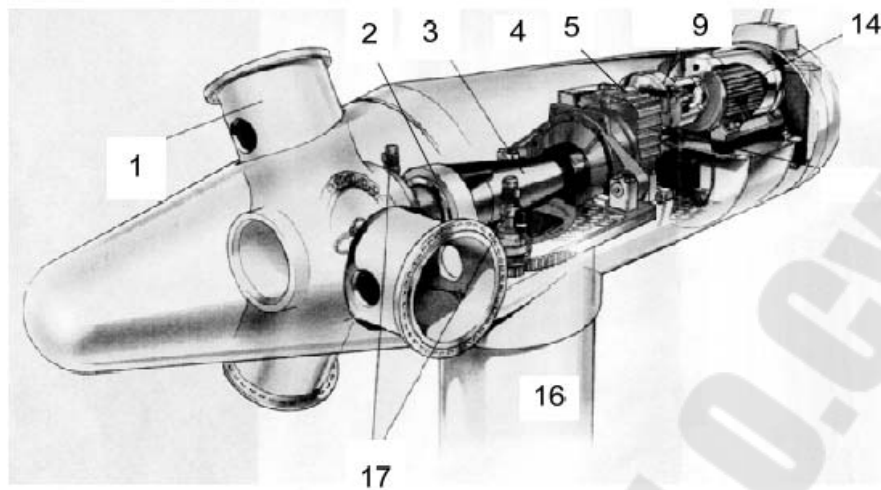
*По стабильности частоты вращения:* установки с постоянной частотой вращения – ветроэлектрогенераторы, синхронизированные с мощной энергосистемой; установки с переменной частотой вращения.

*По способу соединения ветроколеса с генератором:* жесткие или через промежуточный преобразователь энергии, буфер.

**Ветроэнергостановки с горизонтальной осью вращения** – это в основном ветроколеса пропеллерного типа, приводимые во вращение подъемной силой, действующей на лопасть или крыло с аэродинамическим профилем, рис. 2.4 и 2.5.

**Подъемная сила** – составляющая полной аэродинамической силы, перпендикулярная вектору скорости движения тела в потоке жидкости или газа, возникающая в результате несимметричности обтекания тела потоком. В соответствии с законом Бернулли, статическое давление среды в тех областях, где скорость потока более высока, будет ниже, и наоборот. Например, крыло самолета имеет несимметричный профиль (верхняя часть крыла более выпуклая), вследствие чего скорость потока по верхней кромке крыла будет выше, чем под нижней. Создавшаяся разница давлений и порождает подъемную силу.

Такая установка состоит из собственно пропеллерного ветродвигателя с ветроротором, установленного в вертиголовке в подшипниках и электрического генератора, соединенного с ветродвигателем через редуктор или непосредственно. Ветроголовка устанавливается на мачте с возможностью поворота. Лопасти ветроротора могут поворачиваться вокруг своих осей с целью управления.



*Рис. 2.4.* Общий вид пропеллерной ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения:

1 – ветроротор, ступица ветроротора с приводными электродвигателями поворота лопастей, лопасти; 2 – крепление подшипника, подшипник; 3 – вал ротора ветродвигателя; 4 – корпус ветроголовки; 5 – коробка передач (редуктор); 6 – опора; 7 – тормоз ротора; 8 – вал генератора; 9 – измерительное устройство (флюгер и анемометр); 10 – теплообменник; 11 – станина; 12 – горизонтальная поворотная платформа ветроголовки с поворотным диском, горизонтальным тормозным диском и приводным электродвигателем; 13 – муфта сцепления; 14 – электрический генератор; 15 – опора генератора; 16 – опорная конструкция – мачта; 17 – приводные электродвигатели поворота платформы ветроголовки и поворота лопастей

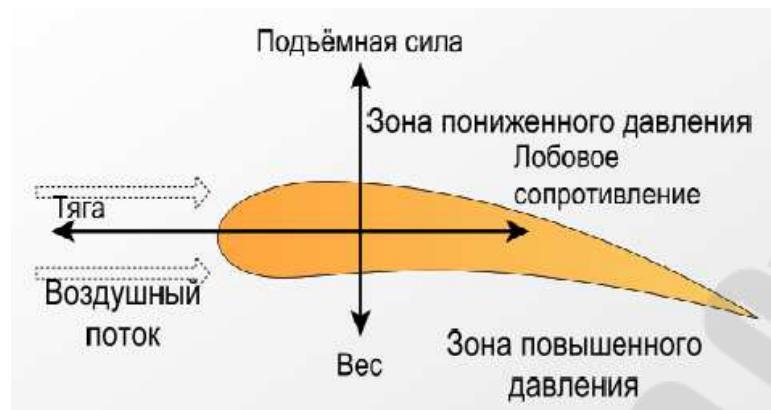


Рис.2.5. Действие подъемной силы

**Ветроэнергетические установки с вертикальной осью** находятся в рабочем положении при любом направлении ветра, рис. 2.6, и позволяют устанавливать генератор внизу. Недостатки таких установок – большая подверженность усталостным разрушениям из-за возникающих колебательных процессов и пульсация вращающего момента, приводящая к нестабильности выходных параметров генератора, а также низкая эффективность преобразования ветрового потока в установках, использующих силу сопротивления. ВЭУ с вертикальной осью: ротор Савониуса (рис. 2.6, ротор Дарье (рис. 2.7, а), ротор Эванса (рис. 2.7, б), ротор с откидными пластинами (рис. 2.8, а), роторная ветроэнергетическая установка с вертикально-осевым ротором Флеттнера (эффект Магнуса), (рис. 2.8, б).

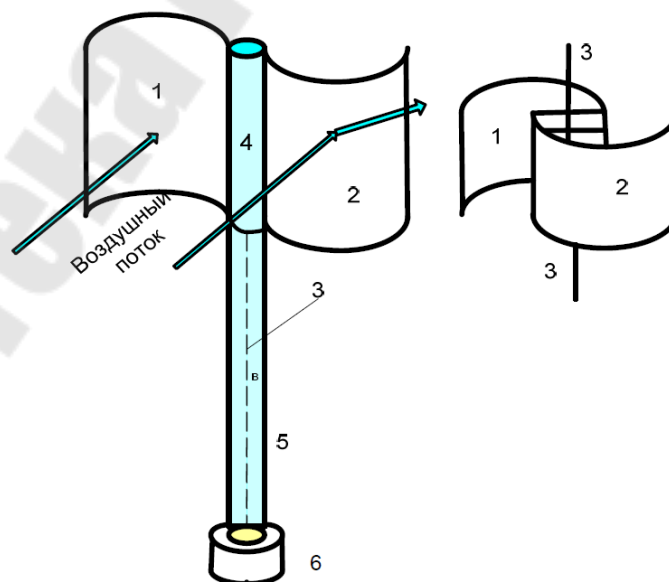


Рис.2.6. Ветроэнергетическая установка с вертикально-осевым ротором Савониуса: 1, 2 – лопасти; 3 – вертикальный вал; 4 – вращающаяся ветроголовка; 5 – башня; 6 – электрический генератор

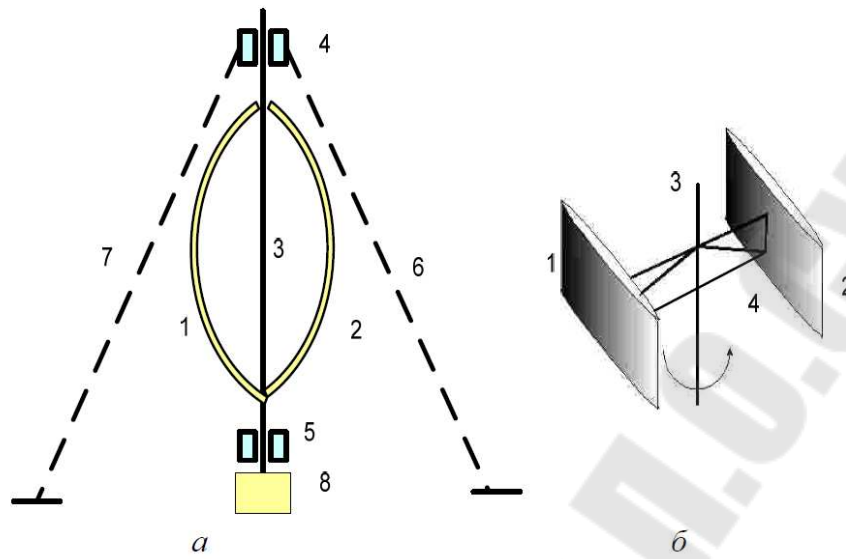


Рис. 2.7. а – ротор Дарье: 1, 2 – лопасти; 3 – вертикальный вал; 4, 5 – подшипниковые узлы; 6, 7 – растяжки; 8 – генератор; б – ротор Эванса: 1, 2 – лопасти; 3 – вертикальный вал; 4 – ось поворота лопастей

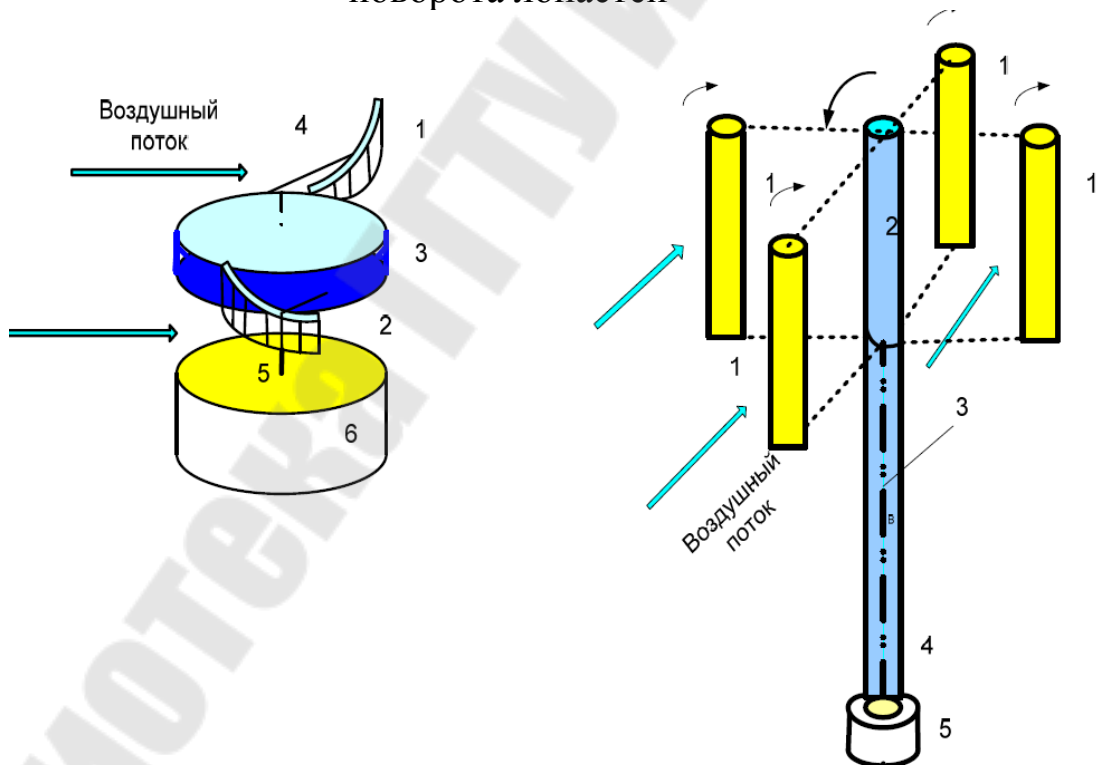


Рис. 2.8. а – ротор с откидными пластинами: 1, 2 – откидные пластины-лопасти; 3 – ветроротор; 4 – пружины; 5 – вертикальный вал; 6 – электрический генератор; б – роторная ВЭУ с вертикально-осевым ротором Флетнера: 1 – лопасти, установленные на вращающейся ветроголовке; 2, 3 – вертикальный вал; 4 – башня; 5 – генератор

## 2.4. Основные узлы и системы ветроустановок

Основные элементы автономной ветроэнергетической установки: ветроколесо, генератор, мачта, регулятор, контроллер, инвертор и аккумуляторная батарея (рис. 2.9).

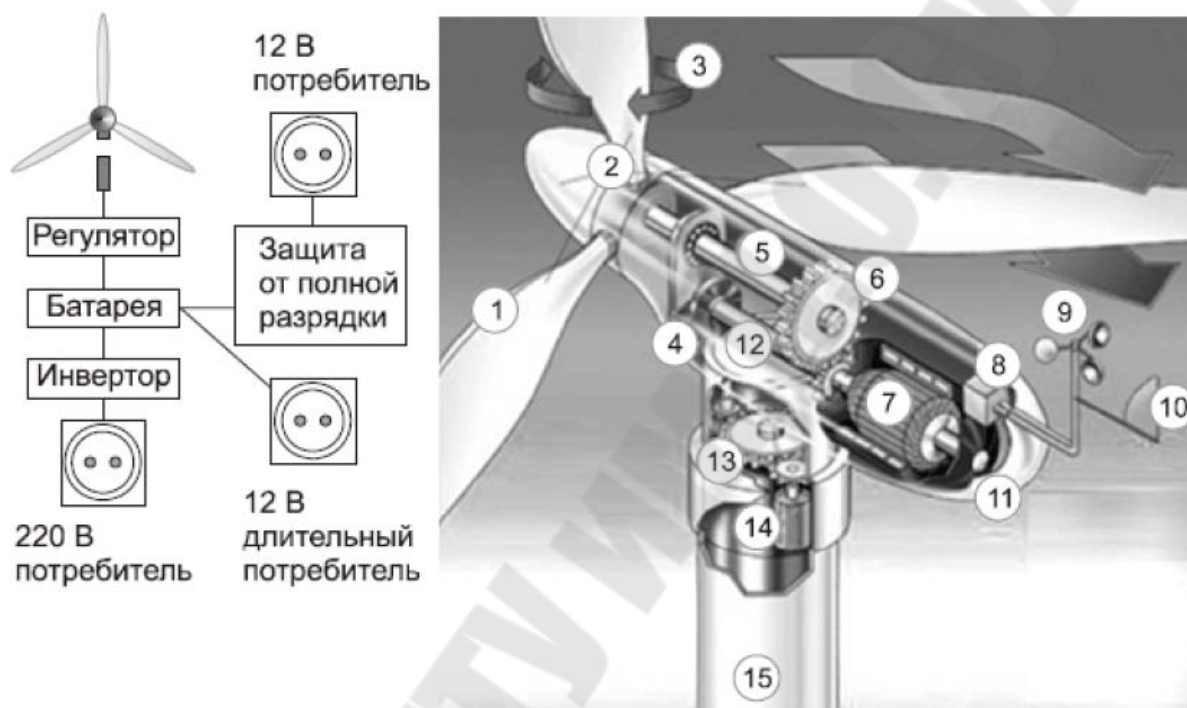


Рис.2.9. Структура автономной ветроэнергетической установки и устройство ветрогенератора:

1 – лопасти турбины; 2 – ротор; 3 – направление вращения лопастей; 4 – демпфер; 5 – ведущая ось; 6 – механизм вращения лопастей; 7 – электрогенератор; 8 – контроллер вращения; 9 – анемоскоп и датчик ветра; 10 – хвостовик анемоскопа; 11 – гондола; 12 – ось электрогенератора; 13 – механизм вращения турбины; 14 – двигатель вращения; 15 – мачта

У классических ветровых установок ветроколесо имеет три лопасти, закрепленные на роторе. Вращаясь, ротор генератора создает трехфазный переменный ток, который передается на контроллер, далее преобразуется в постоянное напряжение и подается на аккумуляторную батарею.

В устройстве автономной энергетической установки ротор, мачта и генератор – основные элементы, но далеко не единственные. Один из важных компонентов – электрический регулятор, который прерывает ток, текущий на батарею, если она полностью заряжена. Без регулятора произойдет закипание электролита. В более сложные

схемы ветроэнергетических установок входит контроллер, управляющий многими процессами ветроустановки (поворотом лопастей, зарядом аккумуляторов, защитными функциями и др.). Он преобразовывает переменный ток, который вырабатывается генератором в постоянный для заряда аккумуляторных батарей.

Накопителем тока служит как минимум одна батарея. Для таких установок требуются специальные батареи (автомобильные не подходят!), которые аккумулируют малейшие токи и потому надежны в плане инерционной и глубокой зарядки (12 В/125 А·ч).

Обычно от батарей могут питаться только 12- или 24-вольтовые потребители. Но при подключении инвертора (преобразователя тока) можно включать приборы на 220 В.

При полном штиле ток, естественно, не вырабатывается, а если подключены пользователи длительного действия (на 12 или 24 В), батареи быстро разрядятся. Если батареи часто подвергаются полной разрядке, то срок их эксплуатации значительно сокращается. Средство профилактики – дополнительное защитное устройство, препятствующее полной разрядке аккумуляторов.

Конструкция ветряных генераторов предусматривает защиту от ураганных ветров. Высокая мачта должна быть надежно закреплена на прочных растяжках (тросами). Все токоподводящие части тщательно изолируют.

#### *Некоторые недостатки ветрогенераторов*

Несмотря на известные преимущества, у ветрогенераторов есть и трудно устранимые недостатки, с которыми приходится считаться.

- Недостаточная мощность средних, "бытовых" ветряков для отопления домов в холодные сезоны. Для решения проблемы можно установить несколько ветрогенераторов или один очень мощный, что дорого и нерационально с точки зрения использования площадей.

- Для установки ветрогенератора требуется много места. Устанавливать его рекомендуется не ближе, чем в 20 м от жилого строения, в противном случае электромагнитные поля, возникающие при работе генератора, могут стать не только источником помех при работе электронной техники, но и причиной заболеваний владельца дома.

- Высокая цена. Окупаемость проекта может растянуться на 3–5 лет.

Схема работы ветрогенераторных систем с потребителем представлены ниже.





Рис. 2.10. Автономное обеспечение объекта (с аккумуляторами).  
Объект питается только от ветроэнергетической установки



Рис. 2.11. Ветрогенератор (с аккумуляторами) и коммутация  
с сетью

АВР позволяет переключить питание объекта при отсутствии ветра и полном разряде аккумуляторов на электросеть. Эта же схема может использоваться и наоборот – ветрогенератор, как резервный источник питания. В этом случае АВР переключает вас на аккумуляторные батареи ветрогенератора при потере питания от электросети.

## 2.5. Перспективы ветроэнергетики в Беларуси

Республика Беларусь обладает развитой промышленностью и системой транспорта с энергоемкими производствами, и энергетикой, на 85 % базирующейся на привозных энергоносителях. В эпоху всеобщего сокращения мировых запасов энергоресурсов, усиления борьбы за обладание этими ресурсами или за доступ к ним и роста цен на импортируемые энергоносители назрела необходимость внедрения новых источников энергии, обеспечивающих энергетическую независимость и энергетическую безопасность страны. Таких источников два: ядерная энергетика и возобновляемые источники энергии, включая местные виды топлива.

Энергия ветра является важнейшим возобновляемым источником энергии. Другие источники: биомасса, гидроэнергия рек, солнечная энергия – менее интенсивны или их использование связано с нарушением экологии. Извлечение энергии биомассы и местных видов топлива сопровождается сжиганием отходов и загрязнением атмосферы. Извлечение гидроэнергии рек сопровождается заливом и потерей значительных территорий, нарушением экологии и условий жизни, что ограничивает возможности гидроэнергетики. Солнечная энергия здесь – значительно менее интенсивна. Анализ ветровых условий Беларуси показывает, что приведенные среднегодовые фоновые скорости ветра составляют 2,8–4,4 м/с, что считается неперспективными для ветроэнергетики. Однако в ряде местностей и в отдельных точках отмечаются более высокие скорости ветра: наибольшие на вершинах некоторых возвышенностей 5–6 м/с и фоновые на возвышенностях – 4,4–4,8 м/с. Такие площадки перспективны для внедрения ветроэнергетических установок.

Главными условиями внедрения ветроэнергетики в Беларуси и странах Балтийско-черноморского региона являются: наличие подходящих ветровых условий и наличие стимулирующего законодательства. Выражение «низкий ветроэнергетический потенциал» указывает только на невозможность повсеместного расположения ВЭС, на необходимость их строительства в местах, где скорость ветра обеспечивает экономическую выгодность проектов. Беларусь обладает значительными ветроэнергетическими ресурсами, а теперь появились стимулирующие тарифы в области ветроэнергетики и других ВИЭ. Расчеты показывают технико-экономическую целесообразность и выгодность строительства

ветроэлектростанций на территории Беларуси при наличии стимулирующего законодательства и в первую очередь стимулирующих тарифов, действующих в течение срока окупаемости, и тарифов, учитывающих экологические преимущества ветроэнергетики и действующих в течение всего срока эксплуатации. Наиболее предпочтительными вариантами первоочередного строительства ВЭС по срокам окупаемости и выработке электроэнергии являются варианты расположения ВЭС на высотах в Гродненской, Витебской и Минской областях, на площадках, где среднегодовая скорость ветра превышает величину 4–4,5 м/с.

***При выборе типа ветроэнергетической установки для ВЭС на территории Беларуси следует руководствоваться следующими принципами:***

– ВЭУ 1500–2000 кВт, имеют серьезные технико-экономические преимущества перед менее мощными установками – меньшие относительные эксплуатационные затраты и затраты на создание инфраструктуры, более эффективное использование ветрового потока, особенно с увеличением высоты мачты до 110 м, наиболее эффективное использование перспективных площадок;

– мировой практикой определен типоряд ветроустановок континентального базирования В12 и типоряд установок прибрежного и морского базирования В15; определены также типоряды В6, В8, В10, соответствующие ветровым климатическим зонам, характерным для равнинно-холмистой местности Балтийско-черноморского региона (куда также относится Беларусь), со среднегодовыми фоновыми скоростями ветра;

– на территории Беларуси целесообразен выбор ВЭУ с расчетной скоростью ветра 11 м/с и высотой опоры 90–110 м;

– целесообразен выбор ВЭУ с прямоприводным синхронным генератором, как наиболее надежный вариант, или применение асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, или асинхронного генератора двойного питания;

– предпочтительно соединение ВЭУ с сетью через статический преобразователь частоты, который обеспечивает возможность работы ВЭУ с переменной частотой вращения и упрощает пусковые процессы;

– при проектировании ВЭС предусматривают возможность ее расширения и соответственно выбирают элементы электрической схемы связи с энергосистемой;

– не внедряют ВЭУ мощностью менее 1 МВт, демонтируемые в европейских странах в связи с техническим перевооружением мировой ветроэнергетики и предлагаемые на рынке ветроэнергетики. Затраты на демонтаж, транспортировку и последующий монтаж таких ВЭУ перекрывают более низкую их стоимость. Ограниченное количество перспективных площадок заполняют установками максимальной мощности. Внедряют только современные ВЭУ мощностью не менее 1 500 - 2 000 кВт континентального базирования;

– при проектировании ВЭС учитывают: наличие построек, хозяйственных или других объектов на территории площадок или вблизи, наличие лесных массивов, кустарника, крупных водоемов, наличие в радиусе 10 км линий электропередачи ЛЭП 6, 10, 35, 110 кВ и проверена возможность подключения ВЭУ 1 500 -2 000 кВт и необходимость реконструкции действующей ЛЭП.

– окончательное решение о строительстве и конструктивных особенностях ВЭС принимают после проведения проектно-изыскательских работ с выполнением контрольных измерений ветрового режима на предполагаемых площадках специализированной метеорологической службой;

– на территории страны существуют зоны, площадки на возвышенностях и на высотах, где среднегодовые скорости ветра составляют 4,8–6,2 м/с и на которых могут быть установлены ВЭУ, обеспечивающие достаточную выработку электроэнергии для обеспечения окупаемости. Появление на рынке ветроэнергетической техники установок континентального базирования мощностью 1 500-2 000 кВт и более с возможностью установки на высоте 90-110 м в принципе изменяет возможности ветроэнергетики в стране. Оказывается, что страна располагает значительными ветроэнергетическими ресурсами, достаточными для обеспечения 10-20 % требуемой электроэнергии при полной окупаемости затрат на создание ветроэлектростанций.

### 3. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

#### 3.1. Характеристики солнечного излучения

Источником энергии солнечного излучения являются термоядерные реакции, протекающие на Солнце.

Солнце излучает в окружающее пространство поток мощности, эквивалентный  $4 \cdot 10^{23}$  кВт. Вследствие реакций ядерного синтеза в активном ядре Солнца достигаются температуры до  $10^7$  К, спектральное распределение потока излучения из ядра неравномерно. Это излучение поглощается внешними неактивными слоями, в результате чего спектральное распределение солнечного излучения становится относительно непрерывным.

Земля находится от Солнца на расстоянии примерно 150 млн км. Площадь поверхности Земли, облучаемой Солнцем, составляет около  $5 \cdot 10^8$  км<sup>2</sup>. Поток солнечной радиации, достигающей Земли, по оценкам экспертов составляет до  $1,2 \cdot 10^{14}$  кВт, что значительно превышает ресурсы всех других возобновляемых источников энергии (для примера, суммарная мощность всех электростанций РБ примерно  $7,8 \cdot 10^6$  кВт).

Солнечный спектр можно разделить на три основные группы:

- 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.

Для количественной оценки излучения применяется величина, называемая интенсивностью.

*Интенсивность,  $E_c$  [Вт/м<sup>2</sup>]* - это мощность лучистой энергии, приходящей за пределами земной атмосферы в секунду на квадратный метр площадки, перпендикулярной солнечным лучам.

Параметром, отражающим влияние атмосферы на интенсивность и спектральный состав солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, является атмосферная масса (АМ).

При нулевой воздушной массе  $АМ = 0$  интенсивность излучения равна  $E_c = 1,35$  кВт/м<sup>2</sup>. Эта величина называется *солнечной константой*.

Необходимо помнить, что в течение как коротких (минуты, часы), так и длительных (сутки, недели) интервалов времени в конкретной точке Земли может отсутствовать полностью или частично прямое солнечное излучение. А в ночные часы солнечное излучение отсутствует вообще. Это означает, что солнечная энергетическая установка на Земле имеет нулевую гарантированную мощность при использовании только солнечного излучения без сочетания с другими источниками энергии. Кроме того, применительно к РБ, солнечное излучение достигает своего максимума в летний период, когда обычно происходит закономерное уменьшение потребления электроэнергии. Соответственно максимум зимнего потребления энергии в стране приходится на период минимального прихода солнечного излучения.

Поток солнечного излучения на Земле существенно меняется, достигая максимума в  $2200 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)/(м}^2\cdot\text{год)}$  для северо-запада США. Запада Южной Америки, части юга и севера Африки, Саудовской Аравии и Центральной части Австралии. РБ находится в зоне, где поток солнечного излучения меняется в пределах от 800 до 1400  $\text{(кВт}\cdot\text{ч)/(м}^2\cdot\text{год)}$ . При этом продолжительность солнечного сияния в РБ находится в пределах от 1700 до 2000 часов в год. Максимум указанных значений на Земле составляет более 3600 часов в год.

### 3.2. Солнечные нагревательные системы

Солнечные нагревательные системы используют энергию Солнца для нагревания воды, воздуха, в дистилляторах, зерносушилках, для обогрева или охлаждения помещений.

Нагревание воды в солнечных нагревательных системах осуществляется приемником, в котором происходит поглощение солнечного излучения и передача энергии жидкости. Рассмотрим некоторые типы нагревательных систем с плоскими приемниками.

**Простейший нагреватель воды** – это открытый резервуар, расположенный на поверхности земли. Емкость с водой нагревается солнечным излучением. Повышение температуры ограничено передачей тепла земле, испарением воды, радиационными и конвективными потерями, а также низким коэффициентом поглощения воды ( $K \ll 1$ ). Нагревание можно улучшить, сделав теплоизоляционную подставку, закрыв резервуар, окрасив его в черный цвет и поместив его в контейнер с прозрачной для солнечного

излучения стеклянной крышкой. Конструкция такого нагревателя приведена на рис. 3.1.

Стеклянная крышка в 4 раза повышает сопротивление потерям тепла от нагретой воды. Нагреватель позволяет повышать температуру воды более чем на 50°C.

Конструкция металлического проточного нагревателя приведена на рис. 3.2-3.4.

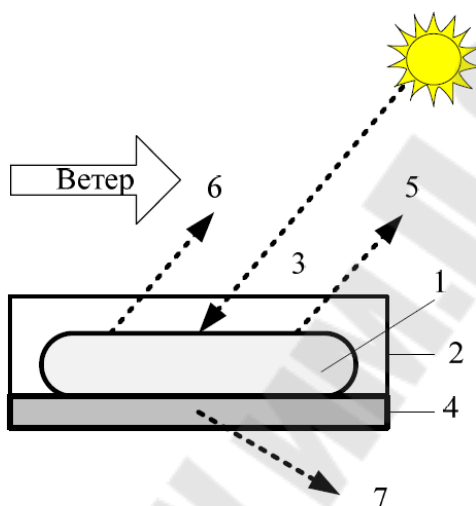


Рис. 3.1. Простейший нагреватель воды: 1 – резервуар; 2 – контейнер; 3 – верхнее стекло; 4 – теплоизоляция; 5 – радиационные потери; 6 – конвективные потери; 7 – потери через дно

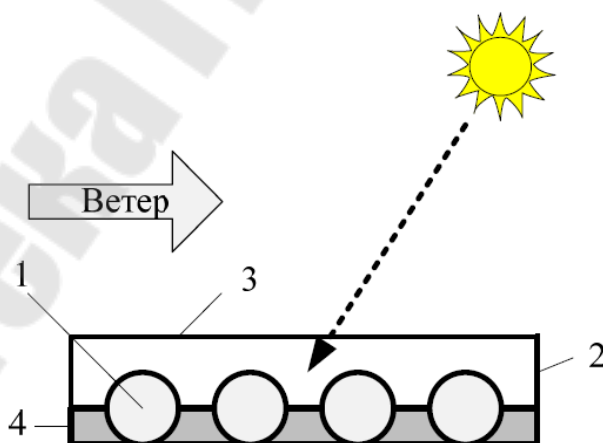


Рис. 3.2. Металлический проточный нагреватель: 1 – металлическая труба-змеевик; 2 – контейнер; 3 – верхнее стекло; 4 – металлическая теплопоглощающая плита

**Система отопления** с приемником в виде металлического проточного нагревателя представлена на рис. 3.3. Она содержит

радиатор отопления, насос принудительной циркуляции, автоматический регулятор, трубопровод.

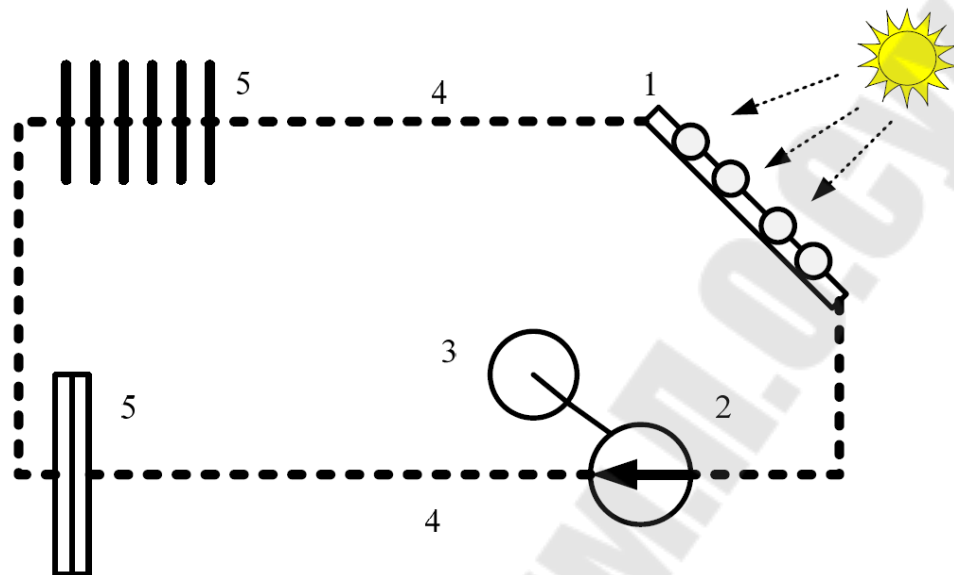


Рис. 3.3. Система отопления с металлическим проточным нагревателем: 1 – металлический проточный нагреватель; 2 – насос принудительной циркуляции; 3 – автоматический регулятор; 4 – трубопровод; 5 – радиатор отопления



Рис. 3.4. Металлический проточный нагреватель

**Селективные поверхности** хорошо поглощают солнечное излучение в коротковолновом диапазоне и одновременно плохо излучают в длинноволновом диапазоне. Такими свойствами обладают



полупроводники, но они хрупки, имеют низкую теплопроводность и дороги. Металлы прочны, хорошо проводят тепло, но и хорошо отражают в видимой и инфракрасной областях спектра. Такие характеристики могут быть получены при использовании медной пластины, покрытой слоем полупроводящей окиси  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Принцип действия селективных поверхностей показан на рис. 3.5. Слой полупроводника  $\text{Cu}_2\text{O}$  хорошо поглощают солнечное коротковолновое излучение (коэффициент поглощения для волн длиной 1 мкм  $K_{\text{КВ}}=0,85$ ) и передает тепло металлу. Сам металл  $\text{Cu}$  слабо излучает в длинноволновом диапазоне (коэффициент излучения  $K_{\text{ДВ}}=0,1$ ).

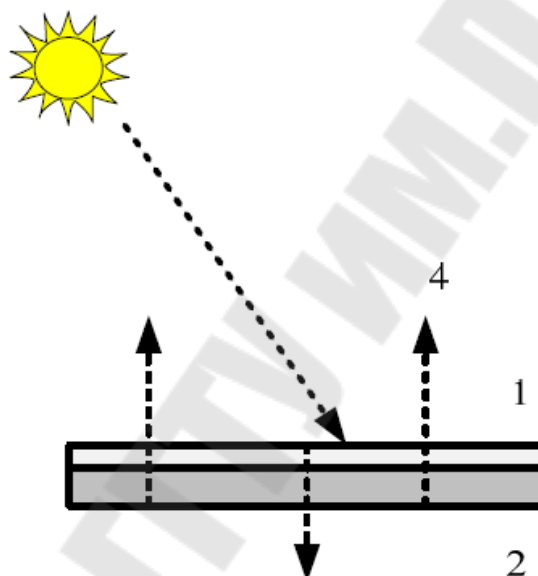
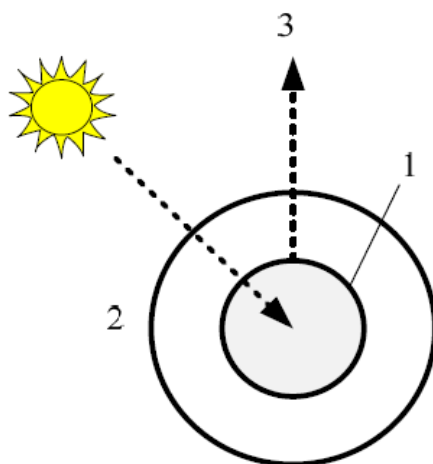


Рис. 3.5. Селективные поверхности: 1 – слой двуокиси меди; 2 – медная пластина; 3 – солнечное коротковолновое излучение; 4 – длинноволновой диапазон излучения

Изготовление селективных поверхностей дорого. Дороже, чем простая черная окраска, поэтому их следует применять при рабочих температурах сотни градусов.

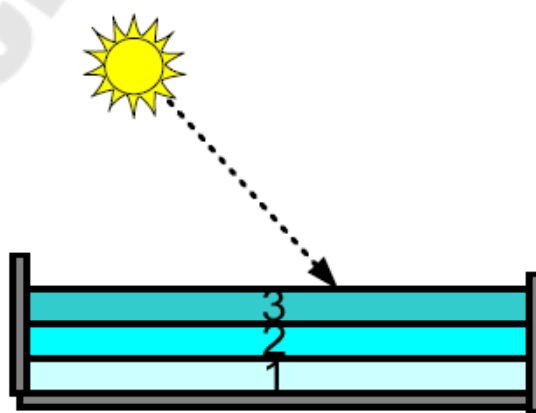
**Вакууммированные приемники** (рис. 3.6) применяются для повышения температуры до 90-100 °С. Для уменьшения конвективных потерь приемник тепла, стеклянная трубка с селективным покрытием, в которой протекает нагреваемая вода, помещается внутри другой стеклянной трубки, а из пространства между трубками выкачивается воздух.



*Рис. 3.6.* Вакууммированный приемник:  
1 – стеклянная трубка с селективным покрытием; 2 – внутренняя стеклянная трубка

Приемник тепла воспринимает направленное и рассеянное солнечное излучение.

Солнечные пруды (рис. 3.7) могут быть использованы для нагрева большого объема жидкости до 100 °С. В водоеме, вырытый в земле, заливается вода в три слоя. Верхние слои (пресная 3 и соленая 2 вода) играют роль теплозащитной крышки. Солнечное излучение поглощается дном водоема и нагревает придонный слой очень соленой воды 1 толщиной около 0,5 м. Ее плотность такова, что даже сильно нагретая, она тяжелее, чем вода в верхнем слое. Поэтому конвекция между слоями не происходит. Повышение температуры ограничивается тепловыми потерями солнечного излучения через верхние слои воды. Высокая теплоемкость и термическое сопротивление воды позволяют сохранять тепло длительное время.



*Рис. 3.7.* Солнечный пруд: 1 – очень соленая вода; 2 – соленая вода; 3 – пресная вода

Солнечные отопительные системы могут быть пассивными и активными.

**Пассивные солнечные отопительные системы** содержат нагреватели воздуха, в которых энергия передается воздуху от поглощающей поверхности. Для улучшения теплопередачи приемную поверхность выполняют шероховатой, с канавками для увеличения площади и усиления турбулентности, необходимой для теплопередачи в воздухе. Пассивная отопительная система, рис. 3.8, содержит массивные приемные площадки 1 с черной поверхностью, обращенной к Солнцу, и усиленную теплоизоляцию.

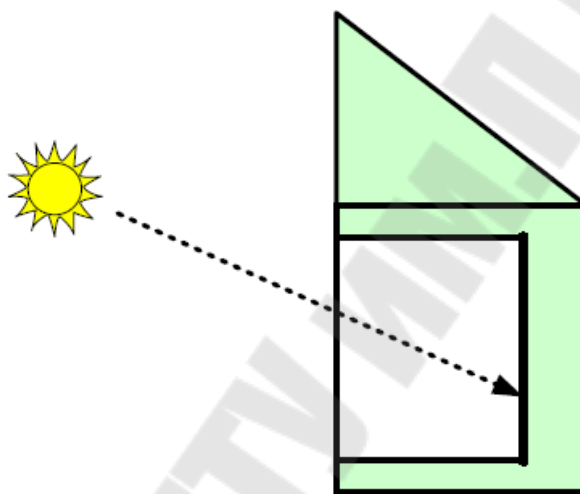


Рис. 3.8. Пассивная солнечная отопительная система

Должна быть обеспечена качественная теплоизоляция и исключены сквозняки. Расположением и конструкцией окон должен быть обеспечен максимальный поток солнечного излучения, проникающий в здание. Если проект выполняется для высоких широт, то большая часть солнечных лучей попадает на вертикальные стены, а не на крышу. Обращенные к солнцу поверхности должны быть черного цвета, а стены – массивными. Недостатком такого проекта является то, что дом нагревается только к середине дня, в нем может быть слишком жарко в течение всего дня, особенно летом.

**Активные солнечные системы** используют внешние нагреватели воздуха или воды. Такие системы лучше контролируются и могут быть установлены на уже существующие здания. Использование водонагревательных систем требует наличия теплообменников, для воздушнонагревательных систем нужны воздухопроводы. Циркуляция теплоносителей осуществляется с

помощью насосов, вентиляторов. Активные системы сложнее и дороже пассивных.

**Опреснение воды** может быть осуществлено в простом солнечном дистилляторе – бассейне с черными стенками и дном, заполненном соленой водой и накрытом прозрачной паронепроницаемой крышкой, рис. 3.9. Крышка наклонена к потоку излучения. Во время работы дистиллятора поток солнечной энергии проходит через крышку, нагревает воду, которая испаряется.

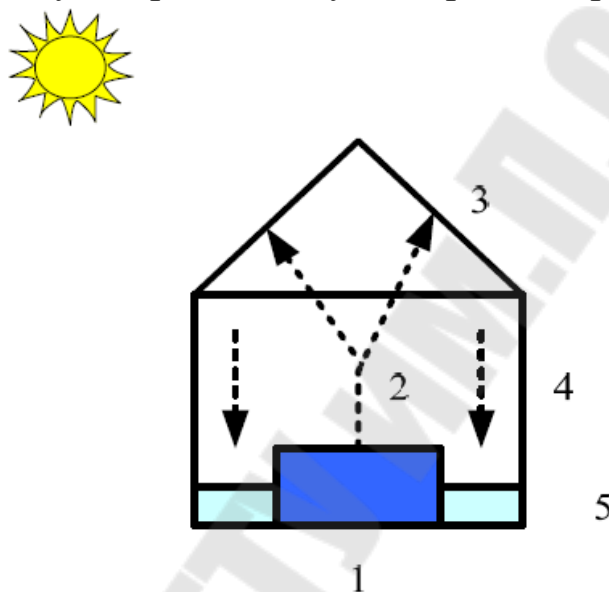


Рис. 3.9. Функциональная схема солнечного дистиллятора: 1 – бассейн с опресняемой соленой водой; 2 – водяной пар; 3 – крышка; 4 – капли конденсата; 5 – приемный желоб

Водяной пар вследствие тепловой конвекции поднимается вверх с нагретой поверхности и конденсируется на холодной крышке, а затем капли конденсата скатываются по крышке в приемный желоб.

Производительность такого опреснителя при потоке излучения  $0,5 \text{ кВт/м}^2$  при удельной теплоте парообразования воды  $2,4 \text{ МДж/кг}$  невелика и составляет около  $8,3 \text{ л/м}^2$  в день.

### 3.3 Солнечные системы для получения электроэнергии на основе термодинамического принципа

Термодинамический принцип преобразования солнечной энергии в электрическую энергию используется в тепловом двигателе (турбине или двигателе внутреннего сгорания). Он состоит в циклическом изменении термодинамического состояния рабочего

тела (на пример, воды-пара), которое перемещается между двумя источниками теплоты, «горячим» и «холодным». Солнечная энергия превращается в тепло в «горячем» источнике, солнечном парогенераторе, пар из которого поступает в турбину. В турбине энергия пара преобразуется в механическую энергию вращения электрического генератора. В генераторе происходит преобразование механической энергии в электрическую энергию. Отработанный пар отдает остаток тепловой энергии в «холодном» источнике-конденсаторе, превращаясь в конденсат, который затем опять поступает в солнечный парогенератор.

В качестве «горячего» источника используются рассредоточенные коллекторы (концентраторы солнечной энергии) или сосредоточенные коллекторы башенного типа.

**Линейно-параболические концентраторы** или концентрирующие коллекторы солнечной энергии позволяют получать температуры 500-700 °С, необходимые для привода в движение стандартного теплового двигателя. Концентрирующий коллектор, рис. 3.10, состоит из приемника П, поглощающего излучение и преобразующего его в нагрев и испарение рабочего тела (например, воды) установки с экраном Э, и линейно-параболического концентратора (зеркала) К в виде оптической системы, которая направляет поток солнечного излучения на приемник. Поглотитель (приемник) расположен в фокусе концентратора вдоль его оси.

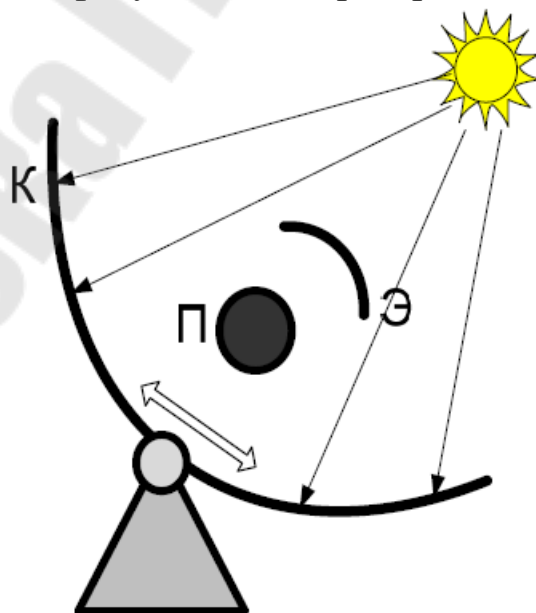


Рис. 3.10. Линейно-параболический концентратор

Практически достижимая температура равна 700 °С из-за того, что реальные зеркала не являются строго параболическими, а полезное тепло выводится из приемника путем прокачки рабочей жидкости. Солнечная система восполняется для получения электроэнергии с использованием концентраторов солнечной энергии, позволяющих получить температуры 700°С и более, достаточные для работы теплового двигателя.

*В параболическом объемном концентраторе* (рис. 3.11) сферической формы (параболоид вращения) концентрация энергии происходит в двух направлениях. В этом случае применяется более сложная система слежения за Солнцем. Максимально достижимая температура приемника при отклонениях профиля зеркала от параболы и неточностях слежения составляет 3000 К. Параболические объемные концентраторы изготавливаются с диаметром до 30 м. Мощность такого устройства составляет около 700 кВт, что с учетом КПД преобразования тепла в механическую, а затем в электрическую мощность, позволяет получить электрическую мощность 100–200 кВт.

Более дешевые концентраторы с низким коэффициентом концентрации, и даже не следящие за солнцем, могут найти применение в солнечных энергоустановках, хотя при этом освещенность солнечных элементов будет не равномерна, а энергия падающего потока используется не полностью.

*Сосредоточенный коллектор башенного типа* состоит из башни, в которой находится приемник солнечного излучения, парогенератора и системы плоских зеркал, направляющих солнечные лучи на башню.

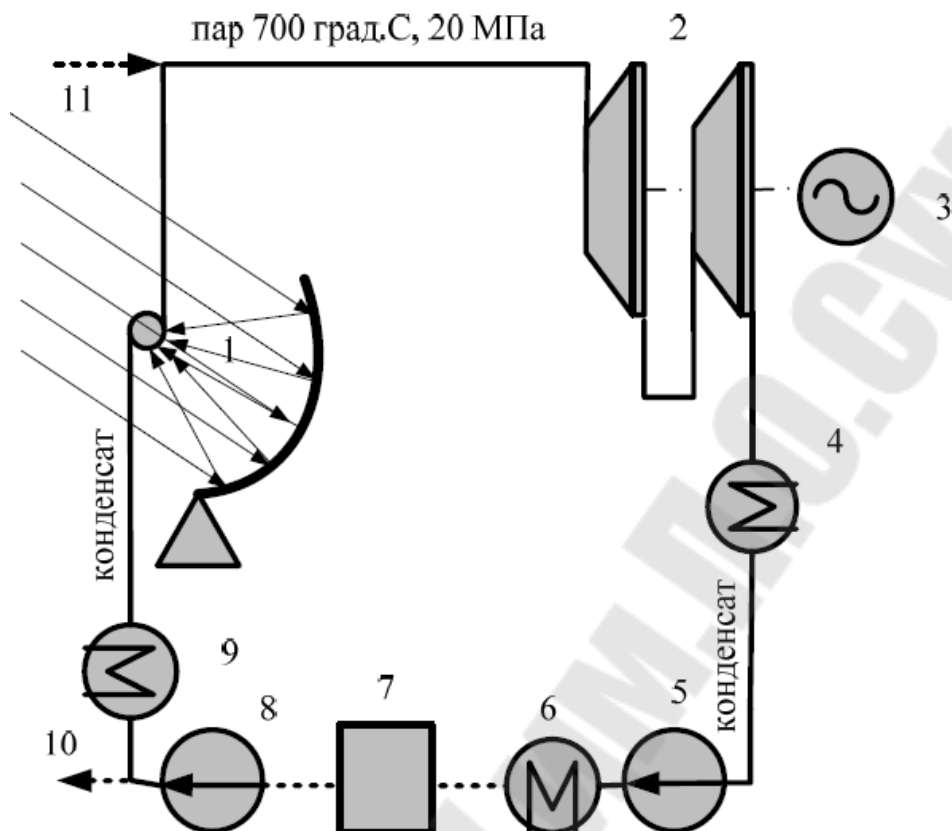


Рис. 3.11. Солнечная паротурбинная энергоустановка с линейно-параболическим концентрирующим коллектором с водой в качестве рабочей жидкости: 1 – концентрирующий коллектор-парогенератор; 2 – паровая турбина; 3 – электрический генератор; 4 – конденсатор; 5 – конденсатный насос; 6 – подогреватель низкого давления; 7 – деаэратор; 8 – питательный насос; 9 – подогреватель высокого давления; 10 – конденсатопровод к другим концентраторам; 11 – паропровод от других концентраторов

**Принципиальная схема солнечной паротурбинной установки солнечной электростанции** с рассредоточенным коллектором-парогенератором, состоящим из множества небольших концентрирующих коллекторов, каждый из которых независимо следит за Солнцем, представлена на рис. 3.11.

В приемнике-парогенераторе за счет получаемой от Солнца энергии вода нагревается. Каждый коллектор-парогенератор передает солнечную энергию теплоносителю – воде, вода испаряется и пар при температуре 600–700 °С и давлении 20 МПа (200 атм) от всех коллекторов собирается в центральной энергостанции. Далее пар направляется в турбину, на одном валу с которой находится

электрический генератор. В турбине он расширяется и происходит превращение его внутренней энергии в механическую работу. Пар приводит во вращение паровую турбину. В генераторе механическая энергия турбины преобразуется в электрическую энергию. Отработанный пар после турбины поступает в конденсатор, где от него охлаждающей водой отводится тепло, конденсируется и затем насосами подается в парогенератор для повторения цикла. Это сопровождается повышением давления при постоянном объеме.

Главный недостаток такой энергоустановки – неравномерность выработки электроэнергии в течение суток (отсутствие в ночное время) и значительные потери тепла на пути от приемников до турбины.

Схема энергетической установки с использованием пара в качестве теплоносителя – аналогична технологической схеме ТЭС, работающей по циклу Ренкина, где в качестве парогенераторов используются приемники солнечного излучения.

#### ***Термодинамические солнечные электростанции:***

1. Кремер – Джанкшен – США – 60 000 кВт – 1987 г. – коллекторный преобразователь;
2. Деггет – США – 45 000 кВт – 1985 г. – коллекторный преобразователь;
3. Солар-1 – США – 12 500 кВт – 1982 г. – башенный преобразователь;
4. Бет-Ха-аравах – Израиль – 5 000 кВт – 1984 г. – прудный преобразователь;
5. Крымская – СССР – Украина – 5 000 кВт – 1986 г. – башенный преобразователь.

### **3.4. Фотоэлектрические генераторы**

Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии осуществляется в ***фотоэлементах или солнечных элементах*** – полупроводниковых приборах, в которых происходит пространственное разделение положительных и отрицательных носителей заряда при поглощении полупроводником солнечного электромагнитного излучения.

***Устройство и принцип действия фотоэлемента*** рассмотрим на примере самого распространенного в настоящее время фотоэлемента на основе кремния. Для изготовления кремниевых



фотоэлементов вначале нужно получить химически чистый кремний и вырастить его кристаллы. Кремниевые фотоэлементы изготавливают путем диффузии фосфора из газовой среды в монокристалл кремния р-типа, получая тонкий слой с n-проводимостью, рис. 3.12. Кристалл кремния толщиной 250–400 мкм с примесью бора, обладающий р-проводимостью с одной стороны подвергают химическому травлению, при котором формируется тонкий слой материала с проводимостью n-типа путем диффузии доноров (фосфора) в поверхностный слой. Кристалл для этого нагревается в вакуумной камере до 1000 °С в атмосфере азота с добавкой хлористо-кислого фосфора.

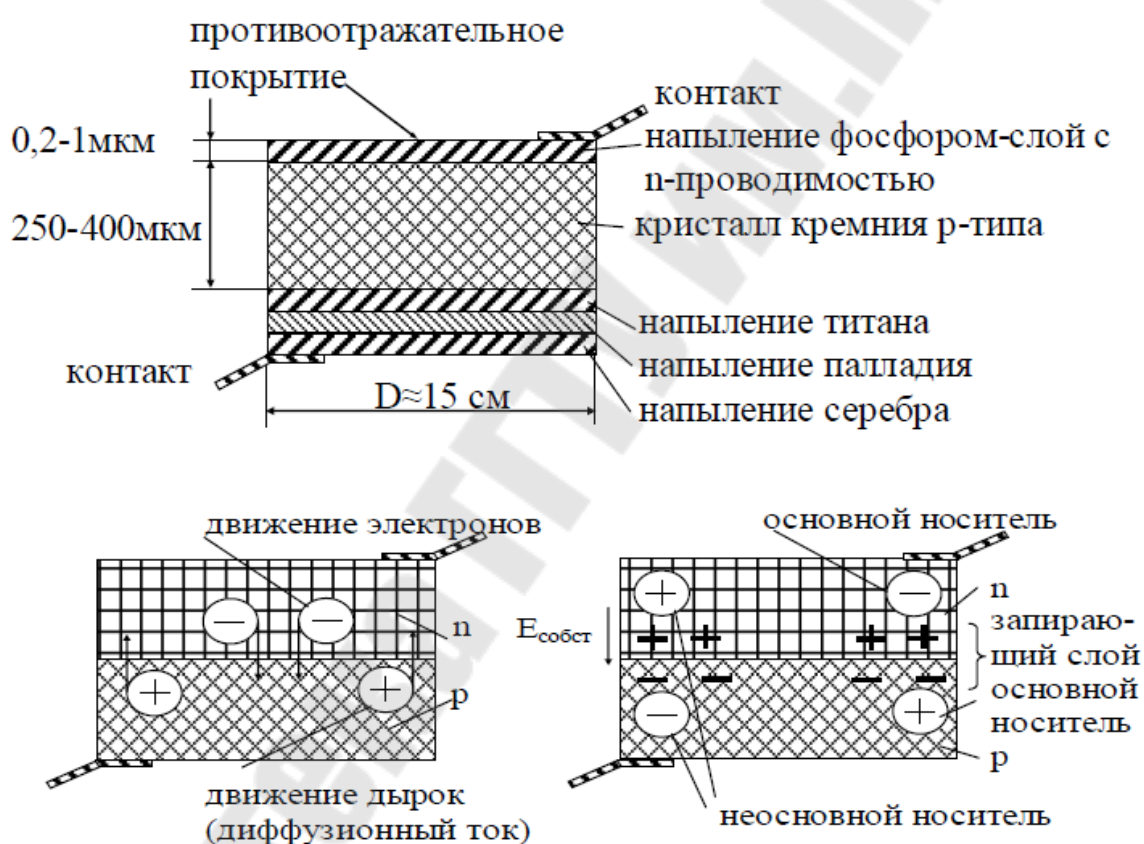


Рис. 3.12. Принцип действия полупроводникового фотоэлемента

Электрические контакты изготавливаются методом фотолитографии. Вначале для создания низкоомного контакта с кремнием испаряют и наносят титан, затем тонкий слой палладия, чтобы предупредить химическое взаимодействие титана с серебром, затем осаждают слой серебра для получения токопроводящей сетки. Последними в процессе вакуумного напыления наносят противоотражательные слои – алюминиевое напыление. На него

наносится электрический металлический контакт. Итак, в кристалле полупроводника созданы две области – с n-проводимостью (электронная проводимость) и p-проводимостью (дырочная проводимость), рис. 3.12. В p-области концентрация основных носителей тока, дырок, значительно превышает концентрацию неосновных носителей, электронов, а в n-области – наоборот. По обе стороны от границы раздела областей возникают неравные концентрации электронов и дырок. Это вызывает их диффузионное движение в сторону меньшей концентрации. Электроны, переходя в p-область, оставляют за собой положительно заряженные ионы, которые не могут принять участие в проводимости, так как жестко связаны с кристаллической решеткой. Дырки, переходя в n-область, оставляют отрицательно заряженные ионы, которые также связаны с решеткой.

Электрическая нейтральность полупроводника нарушается. Между областями p-n возникает контактная разность потенциалов (запирающий слой) и электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии электронов и дырок. Запирающий слой обеднен носителями и имеет пониженную электропроводность. Электрическое поле контакта препятствует диффузионному движению основных носителей, ускоряет движение неосновных носителей: дырок в n-области и электронов в p-области. Неосновные носители легко перемещаются через границу контакта, создавая дрейфовый ток, который по направлению противоположен диффузионному току основных носителей. По мере установления равновесия при контакте диффузионный ток уменьшается, а дрейфовый ток растет, пока оба не уравновесятся.

При облучении фотоэлемента световым потоком или при его нагревании в материале появляются дополнительные свободные носители. Под действием электрического поля p-n-перехода они перемещаются через переход. Если замкнуть цепь, то по ней потечет ток, пропорциональный световому потоку. Таким образом, фотоэлемент сам является источником ЭДС.

Кремниевые кристаллические фотоэлементы имеют КПД 20-25%. Предполагается, что он может быть увеличен до 30-35%. Фотоэлементы (солнечные элементы) размещаются на общей основе (например, пленке) соединяют в сборочные модули, последовательно для получения нужных напряжений и параллельно для получения нужных токов. Модуль состоит из 30-100 фотоэлементов. Модули

размещают на панелях и соединяют в батареи также параллельно и последовательно. Такое соединение имеет недостатки. При выходе из строя одного из элементов или неравномерном освещении его, он переходит в режим диода с прямым или обратным смещением и может перегреться. Для предотвращения лавинного пробоя параллельно фотоэлементам устанавливают шунтирующие диоды. Фотоэлементы располагают в инертном наполнителе под прозрачной, герметичной, водонепроницаемой крышкой.

Основные технические требования к фотоэлементам:

- исходный материал должен быть химически чистым;
- фотоэлементы должны серийно выпускаться и иметь минимальную стоимость;
- срок службы должен быть не менее 20 лет в условиях воздействия окружающей среды при температурах от  $-30$  до  $+200$  °С;
- электрические контакты должны быть защищенными от коррозии, влаги;
- разрушение одного элемента не должно приводить к выходу из строя всей системы (параллельное, последовательное соединение, шунтирующие диоды);
- сборные панели и модули должны быть транспортабельны.

**Тонкопленочные фотоэлементы и панели**, являются наиболее перспективными в солнечной энергетике благодаря существенному снижению производственных затрат. Разработано несколько типов тонкопленочных фотоэлементов. Наиболее известные из них – тонкопленочный аморфный кремний (КПД 10%), тонкопленочный кристаллический кремний, теллурид кадмия (КПД до 16%), селенид меди-индия-галлия (КПД до 20%).

Принцип работы фотоэмульсионной пленки, как и любого другого фотоэлемента, основан на явлении фотоэффекта – «выбивания» электронов из поверхностного слоя полупроводника фотонами.

Преимущества тонкопленочных фотоэлементов: возможность нанесения на поверхности любой конфигурации (стеклянные фасады зданий, оконные стекла зданий и автомобилей), меньшая материалоемкость и стоимость, способность воспринимать рассеянное солнечное излучение, затемнение и нагрев оказывают на них меньшее негативное влияние. Наиболее распространенными являются кремниевые тонкопленочные элементы, в меньшей степени – пленки на основе теллурида кадмия и тонкопленочные элементы из

селенида меди-индия-галлия. Основными производителями тонкопленочных солнечных батарей являются Германия, Япония, США и Китай.

Из других преобразователей солнечной энергии в электрическую энергию можно назвать: термоэлектрические устройства типа термопары, в которых ЭДС возникает в цепи, состоящей из разнородных проводников, контакты между которыми имеют разную температуру, и термоэлектрические генераторы с нагреванием полупроводниковых р-п-переходов. Энергетическая эффективность таких систем – невелика.

**Солнечные фотоэлектрические станции** предназначены для централизованной выработки электроэнергии и для подачи электроэнергии в электросеть. Солнечные (фотоэлектрические) преобразователи формируются из отдельных фотоэлементов, выполненных в виде сборочных модулей, смонтированных на панелях (батареях) и входящих в энергоблоки для получения необходимых мощностей, напряжений, токов.

Энергоблок солнечной электростанции состоит из солнечного (фотоэлектрического) преобразователя, аккумуляторов, преобразователей постоянного тока в переменный (инверторов), блочных трансформаторов, сборных шин, аппаратов управления и защиты, контрольно-измерительных приборов, измерительных трансформаторов и т. д.

**Автономные солнечные электростанции** предназначены для автономного питания электроэнергией небольших установок: космических станций, маяков, жилых и общественных зданий, ферм, светофоров, дорожных знаков, транспортных установок. Они располагаются на крышах, стенах и других элементах конструкций.

Лидером в развитии солнечной энергетики является Германия. Общая мощность крупнейших фотоэлектрических проектов страны составляет 672 МВт.

## 4. БИОЭНЕРГЕТИКА

### 4.1. Биомасса как источник энергии

*Биомасса* – это органические соединения углерода в виде отходов и специально выращиваемых «энергетических» растений. Энергия биомассы возникает в результате фотосинтеза под действием солнечного излучения, в процессе образования органических веществ и аккумуляции в них химической энергии.

В результате фотосинтеза образуются углеводы, содержащие углерод в соединениях с кислородом и водородом (например, сахара  $C_{12}H_{22}O_{11}$  или глюкоза  $C_6H_{12}O_6$ ). В процессе соединения с кислородом при сгорании или гниении биомассы выделяется тепло. При сжигании биомассы в кислороде выход тепла составляет 16 МДж на 1 кг сухого веса. Основными источниками биомассы являются:

- 1) лесоразработки и отходы переработки древесины;
- 2) отходы растениеводства (зерновые и другие, продовольственные и технические культуры, сахарный тростник), продукция энергетического растениеводства (рапс, кукуруза, кормовые бобы уро);
- 3) отходы животноводства (навоз);
- 4) городские стоки, мусор (твердые бытовые отходы).

Переработка биомассы, связанная с извлечением энергии, осуществляется *термохимическими, биохимическими и агрохимическими способами.*

*Термохимические способы* – это прямое сжигание и пиролиз, *биохимические* – спиртовая ферментация и анаэробная переработка, *агрохимические* – экстракция топлив прямо от живых растений (например, получение каучука, выращивание энергетических растений).

### 4.2. Прямое сжигание и пиролиз

**Сжигание биотоплива** с получением тепла используется для приготовления пищи, обогрева жилищ, для сушки зерна, получения электрической и тепловой энергии и т. д.

Приготовление пищи и сжигание топлива в традиционных, часто примитивных, «устройствах» – неэффективно. Их КПД не превышает 5 %. Велики потери из-за неполного сгорания, уноса тепла

ветром, испарения из открытого котла и т. д. Процесс можно улучшить совершенствованием методов приготовления (например, паровые сковородки), уменьшением тепловых потерь (теплоизоляция печей, конструкция нагревателей), улучшением сгораемости топочных газов, применением простых и надежных методов управления нагревателями. Применение древесного угля, принудительной подачи воздуха позволяет повысить эффективность плит и печей до 50 %.

Другие направления по совершенствованию процесса сжигания биотоплива – это применение генераторного газа или биогаза в качестве печного топлива, использование солнечных кухонь и т. д.

В этих процессах в качестве биотоплива широко применяется древесина. Древесину можно считать возобновляемым источником энергии только при условии, что скорость ее прироста превышает скорость уничтожения.

**Пиролиз (сухая перегонка)** – это процессы нагрева или частичного сжигания при недостатке воздуха органического сырья для получения производных топлив или химических соединений. Сырьем служит древесина, отходы биомассы, городской мусор, уголь. Продукты пиролиза – газы, смолы и масла, древесный уголь, зола.

Пиролиз осуществляется в газогенераторах. Схема газогенератора представлена на рис. 4.1.

Подаваемый материал предварительно сортируют для снижения негорючих примесей, подсушивают, измельчают. Температура в печи зависит от соотношения воздух – горючее. Проще всего управление установкой при температуре ниже 600 °С. При более высоких температурах – сложнее управление, но увеличивается содержание водорода в вырабатываемом газе.

Перегонка протекает в 4 стадии:

- при температуре 100-120 °С подаваемый в газогенератор материал опускается вниз и освобождается от влаги;
- при 275 °С – отходящие газы в основном состоят из  $N_2$ , СО и  $CO_2$ , извлекается уксусная кислота и метанол;
- при 280-350 °С – начинается реакция выделения летучих химических веществ таких, как эфиры, фенолы и др.;
- при свыше 350 °С – выделяются все типы летучих соединений, одновременно с образованием углекислого и угарного газа происходит увеличение образования водорода и метана  $CH_4$ , часть углерода сохраняется в виде древесного угля, смешанного с золой.

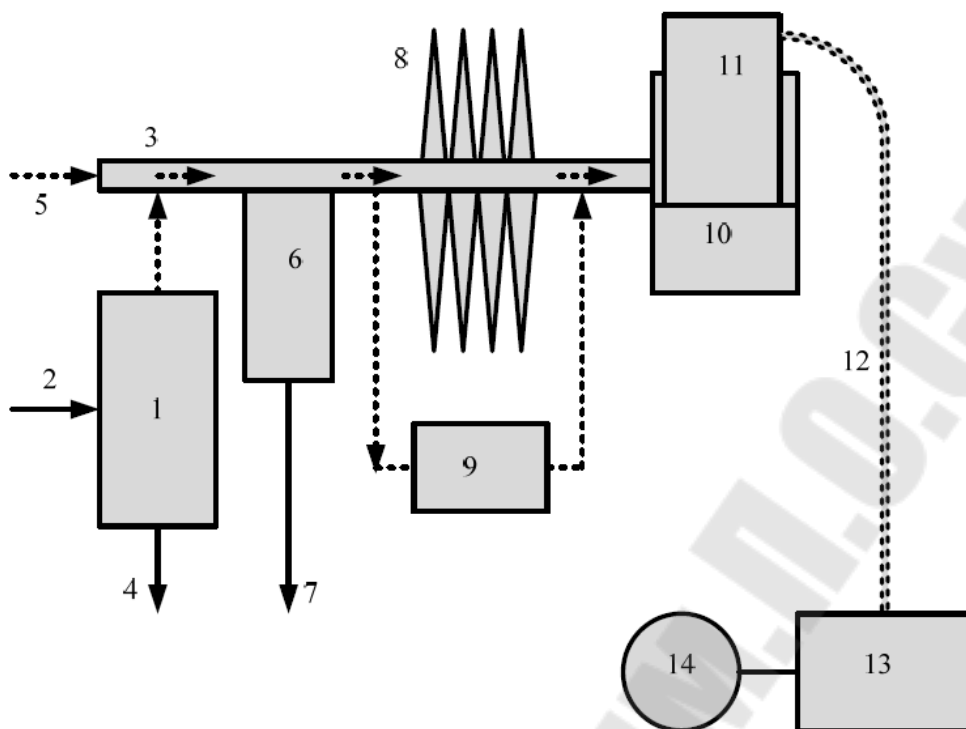


Рис. 4.1. Схема газогенератора:

1 – печь, куда подается и частично сжигается при недостатке воздуха перерабатываемая биомасса; 2, 3 – газопровод; 4 – выход древесного угля; 5 – генераторный газ от других печей; 6 – сепаратор; 7 – производные жидкости и летучие соединения (эферы, фенолы, уксусная кислота, метанол и др.); 8 – сушилка для сельскохозяйственной продукции; 9 – обогрев помещений и приготовление пищи; 10 – газгольдер; 11 – крышка газгольдера; 12 – трубопровод генераторного газа; 13 – двигатель внутреннего сгорания; 14 – электрический генератор

Топливо, полученное при пиролизе, более универсально, чем исходное, но уже имеет меньшую энергию сгорания. «Универсальность» топлива – это более широкий диапазон устройств потребителей, меньшее загрязнение среды, удобство транспортировки, лучшая управляемость горением. В результате переработки получают твердый остаток, жидкости, газы.

Твердый остаток (древесный уголь) составляет 25-35 % сухой биомассы. Он на 75-85 % состоит из углерода, обладает теплотой сгорания 30 МДж/кг. Используется в качестве топлива с контролируемой чистотой, применяется в лаборатории, в промышленности, для выплавки стали (вместо кокса).

Жидкости – смолы, уксусная кислота, метанол, ацетон (30 % от сухой биомассы). Они могут быть отделены или использованы вместе в качестве низкокачественного топлива с теплотой сгорания 22 МДж/кг.

Газы – это генераторный газ (древесный газ, синтетический газ или водяной газ). Он состоит из азота 55 %, водорода 4 %, метана 7 %, углекислого газа 15 % и угарного газа 17 %. Генераторный газ накапливается в газгольдерах при давлении, близком к атмосферному (он не сжимается). Используется в дизелях, карбюраторных двигателях.

Другие термохимические процессы: газификация, гидрогенизация и каталитическая реакция между водородом и окисью углерода.

Разновидность пиролиза – *газификация* – предназначена для максимального получения газообразного топлива при высокотемпературном нагреве (свыше 1000-2000 °С) с окислителем (кислород, воздух, водяной пар, CO<sub>2</sub> или, чаще, их смесь).

*Гидрогенизация* – процесс нагревания измельченной или переваренной биомассы до 600 °С при давлении около 50 атм (5 МПа). Получаемые при этом горючие газы – метан и этан.

Гидрогенизация с применением СО и пара аналогична предыдущему процессу, но нагревание производится в атмосфере СО до 400 °С. Извлекается синтетическая нефть, которую можно использовать как топливо. Каталитическая реакция между Н<sub>2</sub> и СО при 330 °С и давлении 15 МПа дает метиловый спирт (метанол) – ядовитая жидкость, которую можно использовать в качестве заменителя бензина.

### 4.3. Спиртовая ферментация

*Спиртовая ферментация* (брожение) используется для получения этилового спирта (этанол) – С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>ОН. Этиловый (питьевой) спирт образуется из сахаров особыми микроорганизмами, дрожжами, в кислой среде. При концентрации спирта 10 % микроорганизмы погибают. Поэтому дальнейшее повышение концентрации получается перегонкой (дистилляцией). В результате получают смесь 95 % спирта + 5 % воды. При брожении теряется 0,5 % энергетического потенциала сахара. Необходимую для перегонки тепловую энергию получают, сжигая отходы биомассы.



Этиловый спирт получают из сахарного тростника, сахарной свеклы, крахмала. При получении спирта из сахарного тростника вначале отделяют сок для получения сахарозы. Оставшуюся патоку с содержанием сахара до 55 % сбраживают и перерабатывают в спирт.

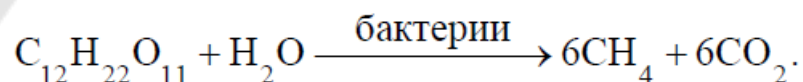
При получении спирта из сахарной свеклы вначале получают сахар для сбраживания. Далее процесс аналогичен. Для получения спирта из растительного крахмала, например, из злаковых, его предварительно подвергают гидролизу на сахар. Крупные молекулы крахмала разрушаются ферментами солода, содержащимися, например, в ячмене или при обработке его сильными кислотами при повышенном давлении. Важный вторичный продукт сбраживания – отходы используются в качестве корма для скота и удобрений.

Этиловый спирт – хорошее жидкое топливо. Он используется в чистом виде (95 %) при небольшой переделке карбюратора или в смеси с бензином 1:10 (газохол). Газохол сейчас обычное топливо в Бразилии. Применяется оно и в США. При применении газохола увеличивается на 20 % мощность двигателей, снижается загрязнение атмосферы по сравнению с применением тетраэтилсвинца.

#### 4.4. Анаэробное сбраживание

**Получение биогаза путем анаэробного сбраживания.** В естественных условиях биомасса разлагается на элементарные соединения в условиях сырости, тепла, темноты в присутствии кислорода под действием бактерий, называемых аэробными. С участием этих бактерий углерод биомассы окисляется до двуокиси углерода (углекислого газа).

В замкнутых объемах с недостатком кислорода развиваются анаэробные бактерии, которые способствуют созданию углекислого газа и метана. В анаэробных условиях происходит процесс «сбраживания». «Биогаз» – это смесь метана и углекислого газа. Его получают в биогазогенераторах (метантенках). Реакция превращения сахарозы в метан в присутствии бактерий



Эта реакция экзотермическая. В процессе ее протекания выделяется 1 МДж тепла на 1 кг сухой массы сбраживаемого

материала. Этого, однако, недостаточно для необходимого повышения температуры массы.

Анаэробное сбраживание влажной биомассы и получение биогаза с последующим его использованием в качестве качественного топлива выгоднее, чем простое высушивание и сжигание исходного материала, так как только удаление 95 % влаги при сушке требует до 40 МДж тепла на 1 кг сухого остатка. Теплота сгорания сухого навоза составляет 12–15 МДж/кг. Кроме того, после анаэробной переработки навоз может быть использован как удобрение.

Получение биогаза экономически выгодно, если биогазогенератор работает на переработке существующего потока отходов (стоки канализационных систем, свиноферм и др.) без их специального сбора, например, в замкнутом экологическом цикле агропромышленного комплекса.

Сбраживание в биогазогенераторе может происходить при температуре 20–30 °С с участием психрофил – психрофилических бактерий с циклом сбраживания 14 суток. При подогреве до 35 °С в процессе участвуют мезофиллы – мезофилические бактерии и процесс ускоряется до 7 сут. При этом скорость реакции в биогазогенераторе удваивается. Для подогрева используется часть биогаза, получаемого в биогазогенераторе или электроэнергия собственного производства. При необходимости ускорения разложения биомассы без увеличения выхода биогаза массу подогревают до 55°С, что соответствует термофилическому уровню анаэробных бактерий и длительности процесса до 3-3,5 сут. В любом случае необходимо поддерживать в биогазогенераторе стабильные условия по температуре и подаче биомассы для выведения подходящих для данных условий популяций бактерий.

В тропиках сбраживание ведется при 20-30 °С без дополнительного подогрева с временным интервалом 14 дней. В средней полосе для сбраживания необходим дополнительный подогрев, например, с использованием части получаемого биогаза.

Процесс сбраживания при психрофилическом процессе идет в три стадии:

1 стадия – расщепление нерастворимых материалов (целлюлоза, жиры, полисахариды) на углеводы и жирные кислоты в течение 1 сут при 20-25 °С;

2 стадия – образование уксусной и др. кислот в течение 1 сут;

3 стадия – образование метана, полное сбраживание массы с получением биогаза (до 70 % метана и 30 % углекислого газа) с примесью водорода и сероводорода в течение 14 сут.

Таблица 4.1

**Теплота сгорания некоторых видов топлива**

<b>Наименование</b>	<b>Величина, МДж/кг</b>	<b>Величина, МДж/л</b>
Водород	120,9	
Бензин	47	34
Этиловый спирт	30	25
Метан	55	$38 \cdot 10^{-3}$
Метанол	23	18
Биогаз	28	$24,7 \cdot 10^{-3}$
Генераторный газ	5-10	$(4-8) 10^{-3}$
Древесный уголь	32	-
Коровий навоз	12	2092 ккал/кг
Древесина сухая	16	

Технологическая и электрическая схема биогазового комплекса для условий умеренного климата для утилизации навоза животноводческого комплекса, использующего электроэнергию в качестве основного источника энергии представлена на рис. 4.2.

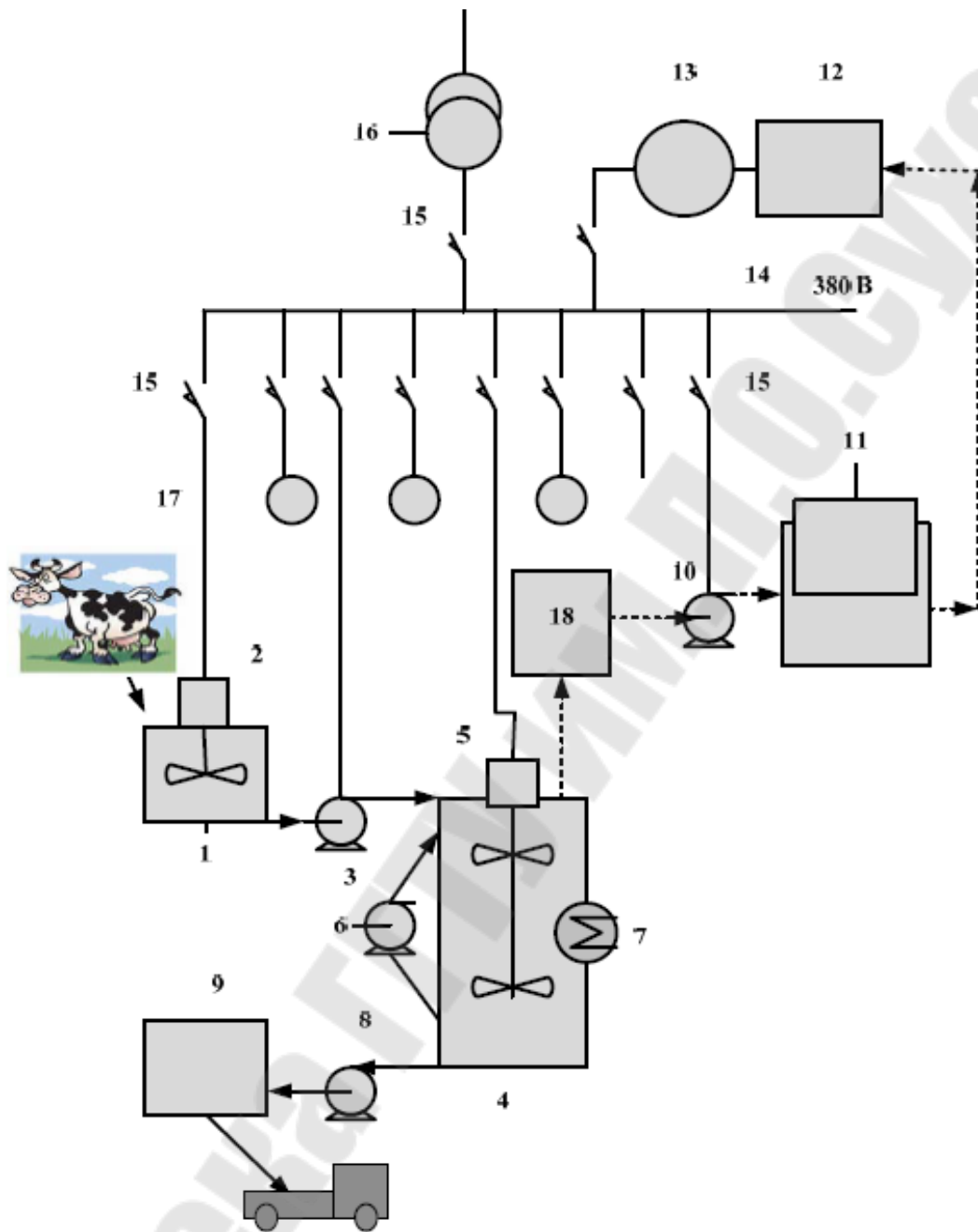


Рис. 4.2. Схема биогазового комплекса:

1 – приемная емкость с мешалкой (накопитель), куда поступает очищенный от соломы и других неактивных материалов навоз; 2 – мешалка; 3 – насос; 4 – биогазогенератор (metantank или реактор); 5 – мешалка; 6 – насос для перекачки навоза в баке; 7 – водяной нагреватель с использованием тепла уходящих газов – двигатель генераторного агрегата (ДГА); 8 – насос для перекачки отработанного навоза в выходную емкость для отходов; 9 – выходная емкость; 10 – компрессор для перекачки получаемого биогаза в газгольдер; 11 – водяной газгольдер; 12 – двигатель внутреннего сгорания;

13 – электрогенератор (12, 13 – ДГА); 14 – шины трансформаторной подстанции предприятия; 15 – коммутирующие аппараты подстанции; 16 – главный трансформатор подстанции предприятия; 17 – приводные электродвигатели вытяжной и приточной вентиляции с калориферами для обогрева помещений, привода механизмов кормораздачи, скребков, а также лампы освещения; 18 – установка очистки биогаза

При работе биогазового комплекса, навоз (экскременты) помещают в накопитель, где он отделяется от несбраживаемых материалов, разбавляется водой для обеспечения влажности 90-94 % и гомогенизируется (перемешивается до состояния однородной массы). Далее масса медленно проходит в биогазогенератор (metantank или реактор), где в присутствии анаэробных бактерий в течение нескольких суток в зависимости от принятого вида бактерий происходит сбраживание. Производительность биогазового комплекса определяется видом и количеством биомассы объекта. Емкость бака биогазогенератора равна суточной производительности комплекса по сырью, умноженной на число суток сбраживания. Затем отработанная масса поступает в бак для отработанной массы, которая используется для удобрения. Полученный биогаз подвергается очистке (удалению сероводорода, углекислого газа, паров воды) и поступает в газгольдер. Давление газа в газгольдере создается тяжелым металлическим газгольдером. Затем газ поступает в двигатель внутреннего сгорания или котельную установку, где сжигается, и его энергия преобразуется в электрическую энергию или тепло.

#### **4.5. Схемы переработки ТБО**

Извлечение биогаза с полигонов ТБО С развитием промышленности и городов, с увеличением населения непрерывно возрастает объем твердых бытовых отходов. В развитых странах ежегодно на одного жителя образуется ~1 т ТБО. Количество их возрастает на 2-4%.

Как вид топлива ТБО – смесь резины, кожи, бумаги, целлофана, древесины, пищевых отходов и т.п. По низшей теплоте сгорания ТБО приближаются к бурым углям и торфу и превосходят их. Использование ТБО дает экономию угля, мазута, газа на 90%,

освобождает территорию свалок под пахотные земли, а также улучшает состояние окружающей среды так как устраняет источники загрязнения водоемов, подземных вод и атмосферы, размножения бактерий и грызунов.

По данным энергетиков США сжигание 165 млн. т/год ТБО экономит 72 млн. т угля в год. Использование ТБО в США в качестве топлива экономит до 1% расхода энергии в США; 12% энергии от сжигания угля или 33% энергии вырабатываемой ГЭС.

По данным энергетиков Франции 10% потребляемой теплоты можно покрыть за счет сжигания ТБО. Теплота при сжигании 1 т ТБО эквивалентна 250 кг нефти. При соответствующих условиях мусоросжигательные установки, которыми оснащены ТЭС могут работать без дополнительных энергоносителей (угля, нефти). При этом пар может быть использован как технологический или для выработки электроэнергии.

После захоронения уплотненных отходов начинают процессы их химико-биологического преобразования:

1. *Аэробная фаза* (продолжается до нескольких месяцев), активизируется деятельность бактерий, существующих с минимумом кислорода, изменяются физико-химические свойства отходов.

2. *Анаэробная метановая фаза* (несколько месяцев – год). Активизируется деятельность метанобразующих бактерий. Химический состав стабилизируется.

3. *Анаэробная стабильная метановая фаза* (от нескольких лет до десятилетий). Активизируются деятельность бактерий, разлагающих (без доступа воздуха) органические составные части отходов до метана, углекислого газа и воды.

Известно, что существуют следующие технологии переработки и обезвреживания ТБО:

- захоронение на полигонах с естественным разложением отходов в течение многих десятилетий. Период полураспада ТБО в таких условиях составляет 30-60 лет;

- мусоросжигание и газификация;

- переработка коммерчески выходных фракций: ПЭТФ, металла, стекла и т.д.;

- биотермирование (активное компостирование) – процесс с получением тепловой энергии и твердых органических удобрений;

- биогазификация: пассивная в земляных картах, активная – в стационарных биореакторах – метантенках; – сжигание в

газогенераторах с получением горючих газов (тепловой и электрической энергии) и шлама, который затем используется в качестве строительного материала (дорожного покрытия).

Перечисленные технологии имеют определенные недостатки, препятствующие их широкому внедрению:

- ✓ сжигание ТБО практически ликвидирует ценную органическую составляющую, которая является исходным сырьем для получения органических удобрений и экологически чистого топлива – биогаза, что особенно актуально для небольших городов и крупных поселков, не имеющих промышленных предприятий и ТБО которых не загрязнены тяжелыми металлами;

- ✓ при сжигании отходов происходит выброс дымовых газов в атмосферу;

- ✓ сепарирование ТБО, с одной стороны, не решает проблему полного обеззараживания органической части ТБО, подвергающейся последующему компостированию, а с другой стороны, этот процесс переводит в  $\text{CO}_2$  до 50% перерабатываемого углерода – потенциального источника топлива;

- ✓ биогазификация в буртах протекает с небольшой скоростью в течение нескольких лет, что не снимает проблему отчуждения земель, хотя и в меньших масштабах, чем при организации полигонов;

- ✓ 90 % оставшихся ТБО сбрасывается в мусорные отвалы, что требует постоянного отчуждения новых земель вокруг городов, как правило, окультуренных, так как период «полураспада» ТБО составляет 30-60 лет.

Наиболее распространенными сооружениями по обезвреживанию ТБО являются полигоны. Современные полигоны ТБО – это комплексные природоохранные сооружения, предназначенные для обезвреживания и захоронения отходов.

Полигоны должны обеспечивать защиту от загрязнения отходами атмосферного воздуха, почвы, поверхностных и грунтовых вод, препятствовать распространению грызунов, насекомых, болезнетворных организмов.

Полигоны строят по проектам в соответствии со СНиП. Схема конструктивных элементов полигона представлена на рис. 4.3. Дно полигона оборудуется противодиффузионным экраном. Он состоит из глины и других водонепроницаемых слоев (битумогрунт, латекс) и предотвращает попадание фильтрата в грунтовые воды.

Фильтрат – жидкость, содержащаяся в отходах, она стекает вниз, на дно полигона, и может просачиваться через его борта. Фильтрат – минерализованная жидкость, содержащая вредные вещества. Собирается фильтрат с помощью дренажных труб и отводится в резервуар для обезвреживания. Ежедневно в конце рабочего дня отходы покрываются специальным материалом и слоями грунта, а затем уплотняются катками. После заполнения секции полигона отходы покрываются верхним перекрытием.

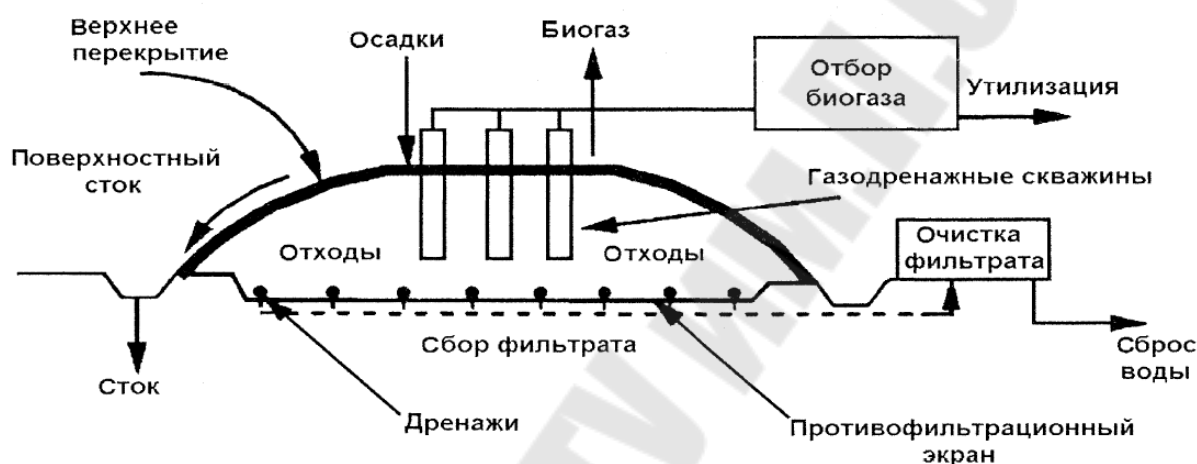


Рис. 4.3. Схема переработки ТБО

В результате анаэробного разложения органической фракции отходов образуется биогаз.

Для сбора биогаза используют вертикальные скважины, газопроводы и компрессорные станции. Для исключения отрицательного влияния биогаза на окружающую среду проводят дегазацию свалок – сбор биогаза. Используют пассивную и активную дегазацию свалок. Пассивная осуществляется за счет избыточного давления, имеющегося в толще свалки. Этот метод применяется редко, так как недостаточно эффективен и требует высокой степени изоляции свалки. Активная дегазация осуществляется с помощью специальных устройств для добычи газа. Система сбора биогаза состоит из нескольких рядов вертикальных колодцев или горизонтальных траншей. Последние заполнены песком или щебнем и перфорированными трубами по которым затем обеспечивается подача газа в газопроводы, а далее по газопроводам к мотор-генераторам (при использовании для производства электроэнергии).



Компрессор создает необходимое разрежение для сбора биогаза и его транспортировки по газопроводам.

*Очистка фильтрата.* Собираемый и отводимый дренажной системой фильтрат токсичен. Фильтрат свалок ТБО сбрасывают в канализацию для последующей совместной обработки с бытовыми сточными водами или подают на поверхность свалки по замкнутому циклу; подвергают биологической обработке (аэробной и анаэробной); подвергают физико-химической обработке. Перекачка фильтрата со свалок в канализационные сети – наиболее распространенный способ. Совместная обработка фильтрата с бытовыми сточными водами допускается только в случае, когда объем фильтрата не превышает 5% подачи стоков на очистную установку. При больших объемах фильтрата ухудшается качество очистки сточных вод, усиливается коррозия узлов очистной установки, осадок сточных вод загрязняется тяжелыми металлами.

На строительство полигона затрачивается около 3 лет, эксплуатируется полигон – заполняется отходами 15-30 лет, на закрытие полигона уходит 1-2 года.

## 5. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

### 5.1 Общие сведения

Гидроэнергетика использует энергию падающей воды. Эта энергия преобразуется с помощью гидроагрегатов гидравлических электрических станций (ГЭС) в механическую энергию в гидротурбине и в электрическую в гидрогенераторе.

Целесообразно использовать гидроэнергии в данной местности при:

достаточно большом годовом стоке и перепаде высот не менее 250-300 м; при годовом уровне осадков не менее 0,4 м;  
равномерном распределении осадков в течение года;  
подходящем рельефе местности и наличии мест для водохранилищ.

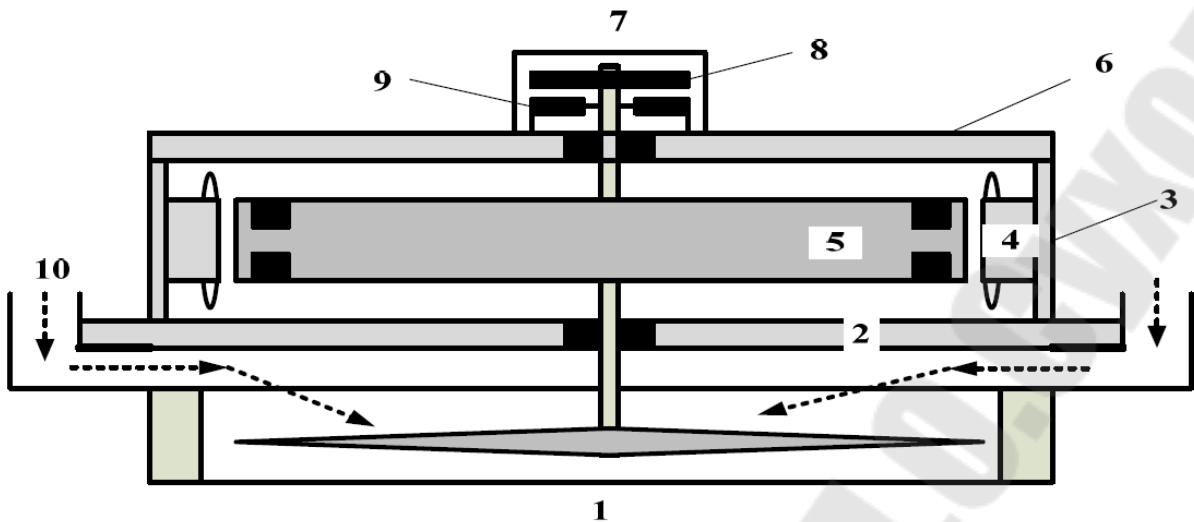
Гидроагрегат состоит из гидротурбины и гидрогенератора, соединенных общим валом.

Гидротурбина преобразует механическую энергию воды в энергию вращающегося вала.

По принципу действия гидротурбины делятся на реактивные радиально-осевые и осевые турбины и активные ковшовые гидротурбины.

По расположению вала рабочего колеса гидроагрегаты делятся на вертикальные, горизонтальные и наклонные. Горизонтальные гидроагрегаты с пропеллерными гидротурбинами могут выполняться в виде капсульных гидроагрегатов.

На общем валу с гидротурбиной находится гидрогенератор, электрическая машина, в которой механическая энергия вращающегося вала преобразуется в электрическую энергию. Конструктивная схема гидроагрегата с реактивной гидротурбиной и синхронным гидрогенератором представлена на рис. 5.1.



*Рис. 5.1.* Конструктивная схема гидроагрегата с реактивной гидротурбиной и синхронным гидрогенератором:

1 – гидротурбина; 2 – нижняя крестовина гидрогенератора с нижним направляющим подшипником; 3 – корпус гидрогенератора; 4 – статор гидрогенератора с трехфазной обмоткой якоря; 5 – ротор (индуктор) гидрогенератора с обмоткой возбуждения постоянного тока и контактными кольцами; 6 – верхняя крестовина гидрогенератора с верхним направляющим подшипником; 7 – корпус подпятника турбогенератора с масляной ванной и системой охлаждения масла; 8 – опорная пята, укрепленная на валу; 9 – подпятник; 10 – направляющий аппарат гидротурбины и рабочий поток воды

**Реактивная радиально-осевая** гидротурбина представлена на рис. 5.2. Ротором гидротурбины является рабочее колесо, соединенное с валом турбины. Рабочее колесо состоит из ступицы, комплекта лопастей и обода. Ступица колеса соединяется с валом турбины. Колесо является рабочим органом турбины, преобразующим энергию водяного потока в механическую. В реактивных турбинах вода подводится к рабочему колесу через направляющий аппарат. Проточная часть реактивной гидротурбины состоит из спиральной камеры гидротурбины, направляющего аппарата, регулирующего расход воды, рабочего колеса и отсасывающей трубы, отводящей воду от гидротурбины. По способу регулирования мощности реактивные гидротурбины бывают одинарного и двойного регулирования. Гидротурбины одинарного регулирования содержат направляющий аппарат с поворотными (регулирующими) лопатками, через который вода подводится к

рабочему колесу. У гидротурбины двойного регулирования вокруг своих осей могут поворачиваться лопасти рабочего колеса и лопатки направляющего аппарата. Гидротурбины одинарного регулирования применяются при напорах до 150 м. Радиально-осевые гидротурбины двойного регулирования применяют при напорах до 500-600 м. Мощность до 700 МВт.

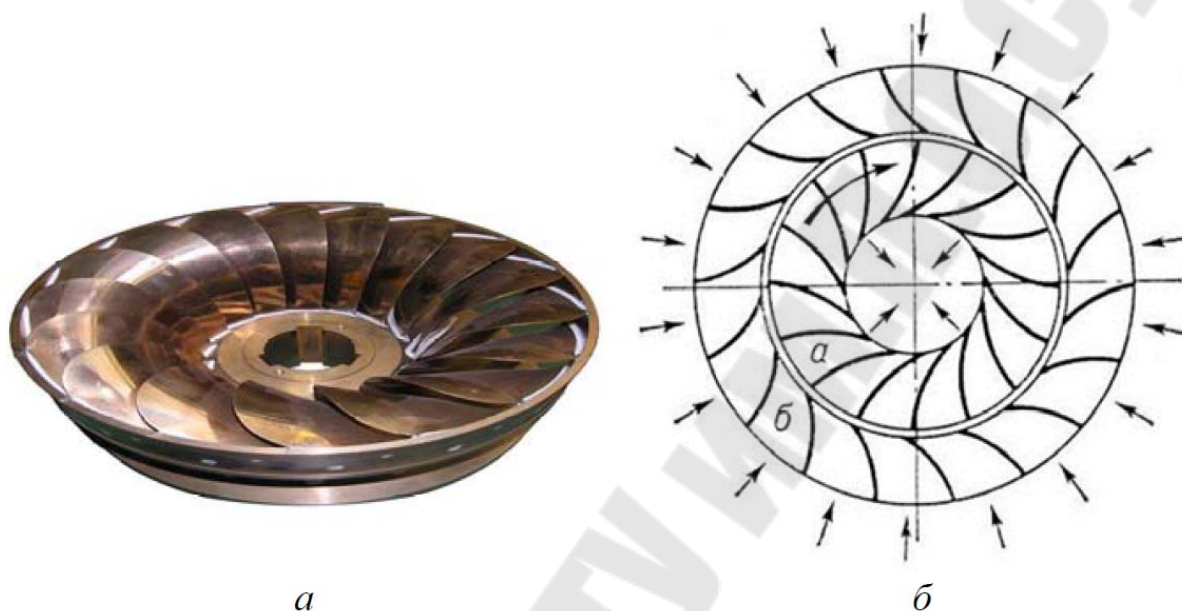


Рис. 5.2. Схема реактивной радиально-осевой гидротурбины:  
а – рабочее колесо; б – направляющий аппарат

Статором турбины является несущий элемент проточной части турбины, содержащий направляющий аппарат, который придает необходимое направление потоку воды. Направляющий аппарат турбины является рабочим органом, изменяющим закрутку потока и регулирующим расход турбины за счет поворота лопаток. Снаружи к статору подсоединяется спиральная камера, которая предназначена для подвода воды к направляющему аппарату турбины. Особая форма камеры с уменьшающимися сечениями служит для равномерного распределения потока по всей окружности статора. Отвод воды от рабочего колеса осуществляется через отсасывающую трубу.

В рабочем колесе поток сначала движется радиально (от периферии к центру), а затем в осевом направлении (на выход). Основным преимуществом турбин данного типа является самый высокий КПД из всех существующих типов.

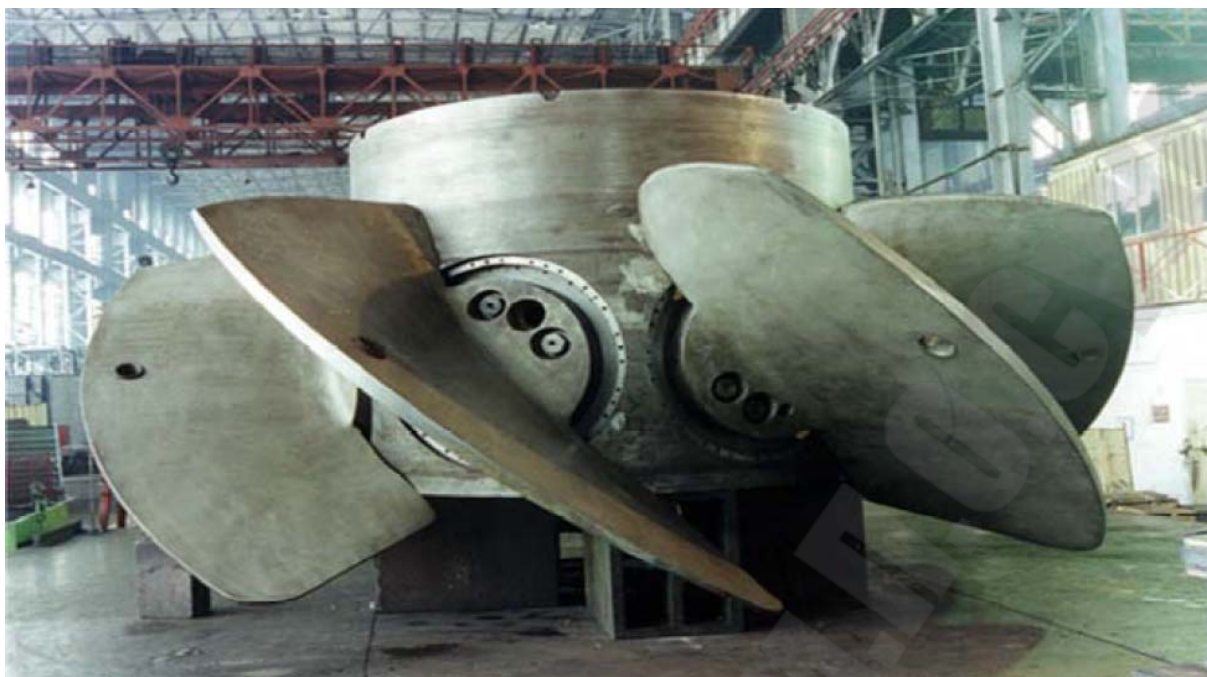
Широкое распространение получили обратимые гидроагрегаты для гидроаккумулирующих и приливных электростанций, состоящие

из насосо-турбины (гидромашины, способной работать как в насосном, так и в турбинном режимах) и двигатель-генератора (электромашины, работающей как в двигательном, так и в генераторном режимах). В качестве обратимых гидроагрегатов применяются только реактивные агрегаты. Для приливных электростанций используются капсульные гидроагрегаты.

В реактивной осевой пропеллерной гидротурбине рабочий поток в рабочем колесе движется в осевом направлении. Рабочее колесо реактивной осевой пропеллерной турбины показано на рис. 5.3. Над рабочим колесом находится направляющий аппарат. Пройдя сквозь его лопатки, вода попадает на лопасти рабочего колеса и, отдав им свою энергию, стекает вниз. Преобразование энергии в пропеллерных турбинах и регулирование их мощности происходит так же, как в радиально-осевых. Пропеллерные турбины быстроходны, просты и дешевы. Для повышения КПД этих турбин их выполняют с возможностью поворота лопастей. С помощью специального механизма, находящегося внутри втулки рабочего колеса, лопасти могут поворачиваться, причем поворачиваются они одновременно с поворотом лопаток направляющего аппарата. При изменении направления и скорость потока воды, выходящего из направляющего аппарата, лопасти рабочего колеса этой турбины всегда бывают повернуты наиболее выгодным образом. Поворотно-лопастные турбины применяются обычно при малых напорах и относительно больших расходах воды. Это самые распространенные турбины крупных ГЭС. Единичные мощности гидроагрегатов на крупнейших ГЭС находятся в пределах 700 МВт.

Реактивная турбина может работать при реверсировании генератора как насос и использоваться на гидроаккумулирующих станциях в двух режимах, турбинном и насосном.

**Активные гидротурбины** – это в основном ковшовые турбины. Они применяются при напорах выше 500–600 м. В них вода к рабочему колесу подводится в виде струй через одно или несколько сопел и поэтому одновременно работает одна или несколько лопастей рабочего колеса. В активных гидротурбинах отсасывающие трубы и спиральные камеры отсутствуют, роль регулятора расхода выполняют сопловые устройства с иглами, перемещающимися внутри сопел и изменяющими площадь выходного сечения. Крупные гидротурбины снабжаются автоматическими регуляторами скорости.



*Рис. 5.3. Рабочее колесо реактивной осевой пропеллерной гидротурбины*

**Ковшовая активная гидравлическая турбина** (рис. 5.4) используется при очень больших напорах. Рабочее колесо активной гидротурбины, вращается в воздухе натекающей на его лопасти или ковши струей воды, т. е. кинетической энергией этого потока. В ковшовых турбинах в отличие от наиболее распространенных реактивных гидротурбин вода подается через сопла по касательной к окружности, проходящей через середину ковша. При этом вода, проходя через сопло, формирует струю, летящую с большой скоростью и ударяющую о лопатку турбины, после чего колесо проворачивается, совершая работу. После отклонения одной лопатки под струю подставляется другая. Процесс использования энергии струи происходит при атмосферном давлении, а производство энергии осуществляется только за счет кинетической энергии воды. Лопатки турбины имеют двояковогнутую форму с острым лезвием посередине; задача лезвия – разделять струю воды с целью лучшего использования энергии и предотвращения быстрого разрушения лопаток. На рабочем колесе может быть установлено до 40 лопаток. Рабочее колесо с лопатками может быть установлено как на горизонтальном, так и на вертикальном валу. При горизонтальном расположении вала к каждому рабочему колесу может подводиться до двух форсунок (поскольку пропускная способность каждой форсунки ограничена); при больших расходах воды применяют

установку на одном валу двух рабочих колес либо используют вертикальную турбину. К последней может подводиться до шести форсунок. Скорость потока воды из форсунок зависит от напора и может достигать значительных величин, порядка 500-600 км/ч. Скорость вращения турбины до 3000 об. мин. Ковшовые гидротурбины применяются при напорах более 200 м, при расходах до 100 м<sup>3</sup>/с. Мощность наиболее крупных ковшовых турбин может достигать 200-250 МВт и более. При напорах до 700 м ковшовые турбины конкурируют с радиально-осевыми, при больших напорах их использование безальтернативно. Как правило, ГЭС с ковшовыми турбинами построены не по плотинной, а по деривационной схеме.

Ковшовые турбины применяются на малых ГЭС, сооружаемых на небольших реках с большими падениями в горных районах. Преимуществами ковшовых турбин является возможность использования очень больших напоров при небольших расходах воды. Недостатки турбины - неэффективность при небольших напорах, невозможность использования как насоса, высокие требования к качеству подаваемой воды (различные включения, такие как песок, вызывают быстрый износ турбины).

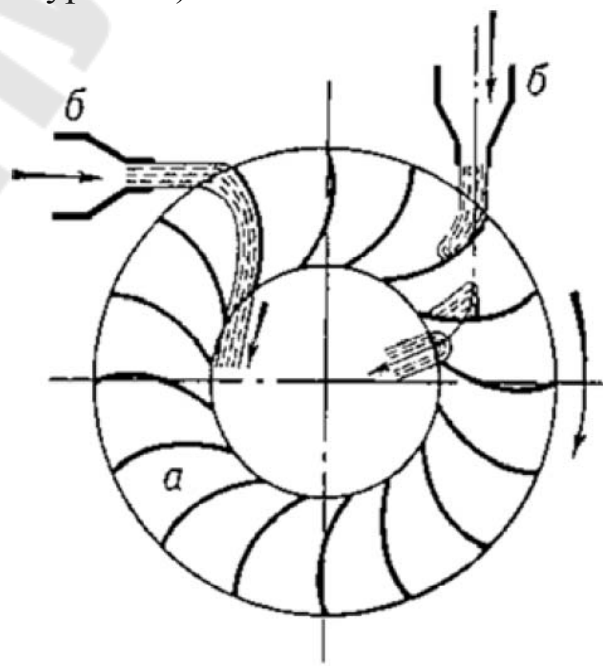


Рис. 5.4. Ковшовая активная гидравлическая турбина:  
а – рабочее колесо ковшовой турбины; б – сопло турбины

Крупнейшие в мире ковшовые турбины мощностью 423 МВт установлены на швейцарской ГЭС Vieudron.

Гидроэнергетика обеспечивает производство 63 % возобновляемой и 19 % всей электроэнергии в мире. ГЭС производится более 2,7 трлн кВт·ч электроэнергии в год. Потенциальные возможности гидроэнергетики составляют еще 1,5 млрд кВт, не считая малых рек и маломощных установок, суммарная мощность которых может быть значительной.

***Крупнейшие в мире гидроэлектростанции:***

1. Три ущелья – Китайская народная республика – р. Янцзы – 22,4 млн кВт, 32 турбины по 0,7 млн кВт. Окончание строительства 2012 г. (рис. 5.5);

2. Итайпу – Бразилия – Парагвай – р. Парана – 14 млн кВт – 20 турбин;

3. Гури – Венесуэла – р. Карони – 10,3 млн кВт – 20 турбин;

4. Гранд Кули – США – р. Колумбия – 6,5 млн кВт – 13 турбин;

5. Саяно-Шушенская ГЭС – СССР – Россия – р. Енисей – 6,4 млн кВт;

6. Красноярская ГЭС – СССР – Россия – р. Енисей – 6 млн кВт – 12 турбин.



*Рис. 5.5. Гидроэлектростанция «Три ущелья»*

Лидерами по выработке гидроэнергии в абсолютных значениях являются Китай, Канада, Бразилия, на душу населения – Норвегия, Исландия и Канада.

Наиболее активное гидростроительство на начало XXI века ведет Китай, для которого гидроэнергия является основным потенциальным источником энергии – в этой стране размещено до



половины малых гидроэлектростанций мира, крупнейшая ГЭС мира «Три ущелья» на р. Янцзы, а также строится крупнейший в мире каскад ГЭС общей мощностью более 100 млн кВт.

Еще более крупная ГЭС «Гранд Инга» мощностью 39 млн кВт планируется к сооружению на р. Конго в Демократической Республике Конго.

Крупная ГЭС «Великая плотина возрождения Эфиопии» мощностью 6 млн кВт строится на реке Голубой Нил в Эфиопии.

ГЭС большой мощности не всегда экологически чистые. При их строительстве происходит затопление значительных площадей, лесных массивов, полей, заболачивание, заиливание. Меняются режимы рек, морей, условия жизни рыбы, животных. Приходится переселять и менять жизнь сотням тысяч людей. Примеры: строительство ГЭС на реках Сибири, гибель Аральского моря.

В качестве примера приведем данные двух ГЭС на Ниле.

Одна из них хорошо известна. Это Асуанская ГЭС в Египте мощностью 2,1 млн кВт. В ее составе 12 турбин с производством электроэнергии 10 млрд кВт·ч в год. Год постройки 1970. ГЭС строилась в 60-е годы для решения социально важных экономических задач, возникших перед Египтом. Эти задачи станция помогла решить: расширились площади орошаемых земель почти на 1 млн га, улучшилось судоходство, была ликвидирована опасность засух и наводнений. Почти вдвое увеличился отбор воды для ирригации. Однако строительство ГЭС привело к значительным потерям: произошло заболачивание местности вокруг водохранилища, засоление сельскохозяйственных площадей в дельте Нила, ухудшение плодородия почвы и увеличение количества используемых в сельском хозяйстве минеральных удобрений, возникла опасность нависания огромной массы воды над всем Египтом (водохранилище имеет 500 км в длину, 22 км в ширину и 90 метров в глубину).

Другая ГЭС на Ниле малоизвестна. Это ГЭС на голубом Ниле в районе Великих Водопадов Нила в Эфиопии. Это деривационная ГЭС небольшой мощности (2 турбины по 4,6 МВт). Водовод пробит в скале рядом с водопадом и подает воду к турбинам без создания водохранилищ и нарушения режима реки. Предметом данного курса являются только экологически чистые малые ГЭС, не требующие затопления больших площадей и не нарушающие экологического равновесия в природе.

## 5.2. Гидроэнергетика Беларуси

В 1950–1960-е гг. в Беларуси работало около 180 малых ГЭС общей мощностью 21 тыс. кВт, со средней годовой выработкой 88 млн кВт·ч электроэнергии, большинство из которых впоследствии были законсервированы или разрушены. В настоящее время действует 41 малая ГЭС мощностью 16,1 тыс. кВт, крупнейшими из которых являются: Вилейская ГЭС на р. Вилия – 2000 кВт, Осиповичская ГЭС на р. Свислочь в Могилевской области – 2 175, Чигиринская ГЭС на р. Друть в Могилевской области – 1 500. Остальные ГЭС – мощностью от 100 до 600 кВт. В 2013 г. закончено строительство Гродненской ГЭС мощностью 17 тыс. кВт.

Технически доступная мощность (также в месяцы максимального водотока) составляет 520 тыс. кВт, экономически целесообразная мощность (тоже в месяцы максимального водотока) – 250 тыс. кВт. Это означает, что электрическая мощность с учетом КПД гидротурбин (80 %) и гидрогенераторов (90 %) составляет: технически доступная – 374 тыс. кВт, экономически целесообразная – 180 тыс. Это также означает, что возможная выработка электроэнергии при коэффициенте использования номинальной мощности гидрогенераторного оборудования 40 % составляет: технически доступная – 1,31 млрд кВт·ч, экономически целесообразная – 0,63 млрд. Наибольший потенциал гидроэнергетики сосредоточен в Гродненской, Витебской и Могилевской областях на участках бассейнов Немана, Западной Двины и Днепра.

Признано целесообразным строительство двух ГЭС суммарной мощностью 37 тыс. кВт на Немане (Гродненская ГЭС мощностью 17 тыс. кВт, Немновская - 20 тыс. кВт), четырех ГЭС на Западной Двине (Полоцкая, Витебская, Бешенковичская, Верхнедвинская) общей мощностью 125 тыс. кВт, четырех ГЭС на Днепре общей мощностью 20,3 тыс. кВт.

Предполагаемая выработка электроэнергии ГЭС к 2020 г. составит 860 млн кВт·ч. Капитальные затраты на строительство ГЭС в Беларуси составляют 4 000-7 000 долл. на 1 кВт установленной мощности. Срок службы 50-60 лет.

*Гидроэнергетический потенциал* – это не установленная мощность электростанций и не мощность водотока, а возможная выработка электроэнергии, при которой в определенные сроки окупаются затраты на строительство ГЭС, на создание

водохранилища, окупается потеря земли, затраты на переселение людей и на ликвидацию ущерба, нанесенного природе. Гидроэнергетический потенциал Беларуси достаточно невелик, тем более что водосток малых рек очень нестабилен: малые реки пересыхают жарким летом и промерзают холодной зимой.

В любом случае в Беларуси недопустим залив больших площадей. Особенно в низменной части страны, в Полесье, где уже был проведен один неудачный эксперимент с осушением болот. Ошибка в концепции разработки гидроэнергетических ресурсов чревата серьезными последствиями для жизни людей, а не только потерей денег, в отличие от ветроэнергетики, где просчет или ошибка может стать причиной лишь финансовых потерь, да и то достаточно ограниченных. Каскады гидроэлектростанций негде строить. Большинство рек течет по равнине.

## 6. ЭНЕРГИЯ ОКЕАНОВ

Основные формы энергии океана, которые доступны человеку на современном уровне технического развития или будут доступны в ближайшем будущем – это энергия волн, энергия приливов и тепловая энергия воды, а также энергия биомассы океана, химическая энергия соленой воды, энергия подводных вулканов. Доступная энергия волн в океане и прибрежных волн оценивается в  $80 \cdot 10^{12}$  кВт·ч/год, энергия приливов и течений морей и океанов –  $200 \cdot 10^{12}$  кВт·ч/год, энергия температурного градиента морской воды (разница температур воды у поверхности и на глубине океана)  $10 \cdot 10^{12}$  кВт·ч/год.

### 6.1. Энергия волн

Мощность, переносимая волнами на глубокой воде, пропорциональна квадрату их амплитуды и периоду. Длиннопериодные волны ( $T \approx 10$  с) с большой амплитудой ( $A \approx 2$  м) позволяют снимать с единицы длины гребня до 50 кВт/м.

Проекты использования энергии волн разрабатываются в Японии, Великобритании, в Скандинавских странах. Разрабатываются объекты с единичными модулями 1 000 кВт с длиной вдоль фронта волны около 50 м. Такие установки могут быть конкурентоспособны с дизель-генераторами при электроснабжении удаленных поселков на островах.

Сложности создания волновых энергоустановок обусловлены нерегулярностью волн по амплитуде, частоте, направлению, возможностью 100-кратных перегрузок при штормах и ураганах, расположением на глубокой воде, вдали от берега, сложностью согласования низкой частоты волн (0,1 Гц) и высокой частоты электрического генератора (50 Гц).

Волновые энергоустановки используют следующие принципы: принцип «колеблющегося водяного столба», принцип «колеблющегося поплавка», принцип «перелива».

Принцип «колеблющегося водяного столба» заключается в том, что набегающая волна заставляет воду двигаться «вверх-вниз» в специальной камере, заполненной сжатым воздухом. Потoki морской воды вытесняют воздух из камеры, а тот в свою очередь, в результате возникающего давления, начинает вращать лопасти турбин и

генерировать электрическую энергию. Первые волновые турбинные электростанции были установлены в прибрежных районах Шотландии, Португалии и Японии.

Волновая энергоустановка, использующая колеблющийся водяной столб, рис. 6.1, размещается на грунте. Она состоит из нижней вертикальной камеры, сообщающейся с морем и имеющей два отверстия с клапанами, и воздушной камеры 3 с двумя отверстиями с клапанами 5 и 6, с диффузором и турбиной 8, соединенной валом с электрическим генератором 9.

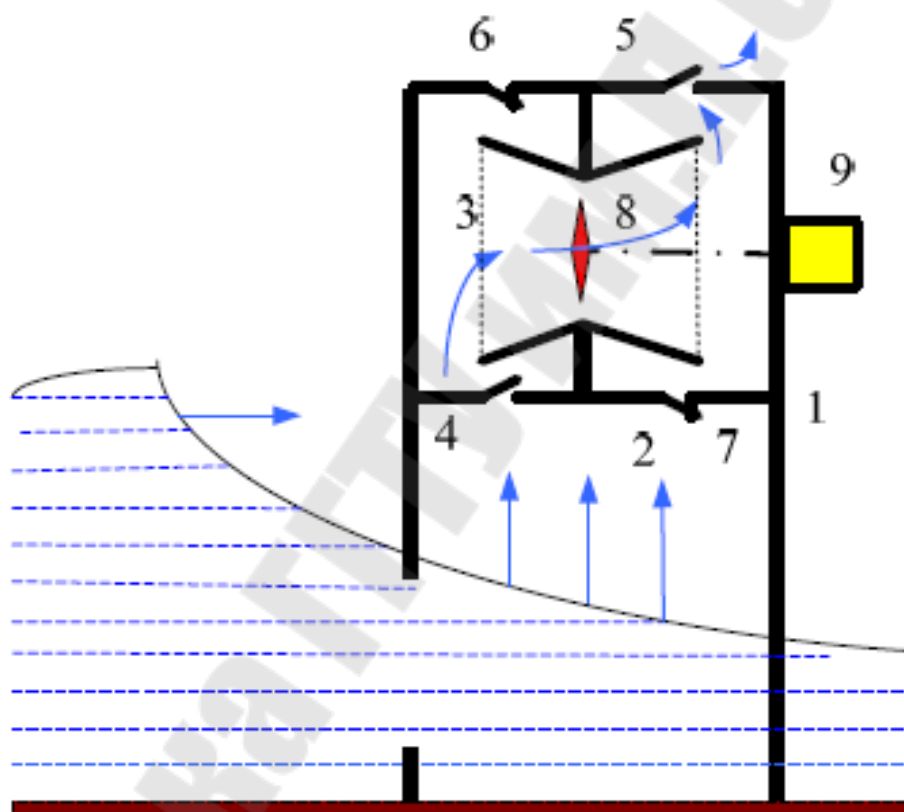


Рис. 6.1. Волновая энергоустановка, использующая колеблющийся водяной столб:

1 – корпус волновой энергоустановки; 2 – нижняя вертикальная камера; 3 – воздушная камера; 4, 7, 5 и 6 – отверстия с клапанами; 9 – диффузор; 8 – турбина; 9 – электрический генератор

При набегании волны на частично погруженную полость нижней камеры, открытую под водой, столб воды в полости колеблется, и изменяет давление воздуха над жидкостью. С помощью клапанов воздушный поток регулируется так, что проходит через турбину в одном направлении. При набегании волны воздушный

поток из нижней камеры под давлением проходит через клапан 4 в верхнюю камеру, через диффузор, приводит во вращение турбину и выходит наружу через клапан 5. При сбегании волны клапаны 4 и 5 закрыты. Под действием разрежения, возникающего в нижней камере, воздух засасывается снаружи в верхнюю камеру, проходит через диффузор в прежнем направлении и через клапан 7 попадает в нижнюю камеру. На этом принципе действуют энергоустановки, внедренные в Японии, Великобритании, Норвегии (500 кВт).

Возможны другие конструкции энергоустановок, например, подводное устройство, которое состоит из плавучего корпуса – поплавка, закрепленного под водой на опорах, установленных на грунте. Под воздействием подповерхностного движения вод он совершает колебательные движения, которые преобразуются в движение поршневого насоса. Жидкость подается на генераторную станцию по трубопроводам.

Принцип «колеблющегося поплавка» заключается в том, что электроэнергия образуется за счет поступательного движения рабочего элемента от волнения морской воды. Специальный поплавок поднимается и опускается или раскачивается из стороны в сторону, в зависимости от направления движения волны. На других установках, работающих по принципу «колеблющегося тела», вместо поплавка используются подвижные элементы, которые двигаются относительно друг друга, образуя тем самым гидравлическое давление в масле. Разогретое масло вынуждает вращать лопасти турбин, а те в свою очередь генерируют электроэнергию.

Принцип «перелива» основан на естественной закачке воды при набегании волн в резервуар, который установлен выше уровня моря. Набегающие волны поступают в резервуар, а из него вода падает на лопасти турбины, приводя ее во вращение.

## 6.2. Энергия приливов

Приливные колебания уровня в океанах происходят периодически: суточные с периодом 24 ч 50 мин и полусуточные с периодом 12 ч 25 мин. Разность уровней самого высокого и самого низкого – это высота прилива. Она колеблется от 0,5 до 10–11 м. Во время приливов и отливов возникают приливные течения, скорость которых в проливах между островами достигает 4–5 м/с. Причиной возникновения приливов является гравитационное взаимодействие

Земли 1 с Луной 2 и Солнцем, рис. 6.2. Гравитационные же силы удерживают воду на поверхности вращающейся Земли. Плоскость вращения Луны относительно Земли имеет наклон относительно плоскости эклиптики (в которой Земля вращается относительно Солнца) и дважды в течение солнечных суток Луна проходит через экваториальную плоскость.

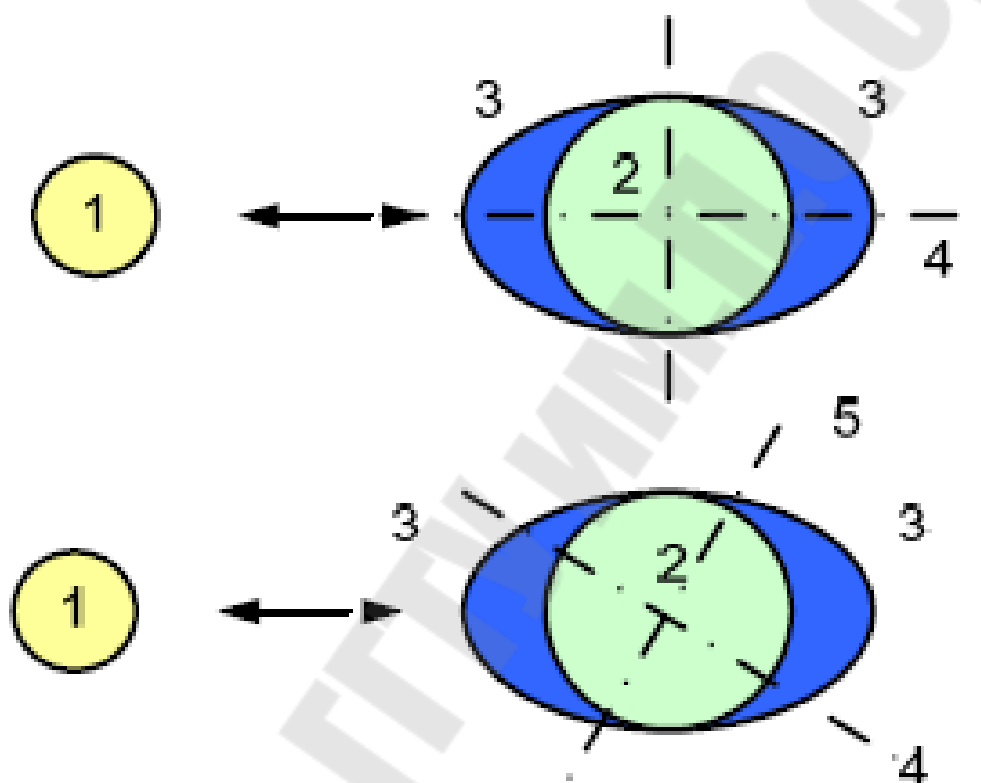


Рис. 6.2. Возникновение приливов:  
1 – Земля; 2 – Луна; 3 – пик; 4 – экваториальная плоскость;  
5 – земная ось

Если Луна находится в экваториальной плоскости Земли, океанские воды втягиваются в пики 3 в точках – максимально приближенной и удаленной от Луны. В ближайшей к луне точке действует увеличенная сила лунного притяжения и уменьшенная центробежная сила, в наиболее удаленной точке – уменьшенная сила лунного притяжения и увеличенная центробежная сила.

Это полусуточные приливы. Они наблюдаются в любой точке два раза в сутки. Обычно Луна не находится в экваториальной плоскости Земли. Поэтому приливы в этой точке возникают также 1 раз в сутки. Это суточные приливы.

На величину возникающих приливов оказывает влияние меняющееся расстояние между Луной и Землей, совпадение или несовпадение лунных и солнечных приливов, место, в котором наблюдается прилив, открытый океан или вблизи побережья, в устьях рек и прочие.

Приливная электростанция (ПЭС) может быть расположена непосредственно в приливном течении, (рис. 6.3).



*Рис. 6.3. Приливная электростанция*

Другой вариант расположения ПЭС – бассейн, отделенный от океана дамбой или плотиной. Во время прилива вода в бассейне поднимается на максимальную высоту. При отливе масса воды пропускается через турбину, вырабатывая электроэнергию.

Развитие приливной энергетики возможно в местах с большими высотами приливов и большими потенциалами приливной энергии, например, на побережье Северной Америки (9-11 м), в западной Африке (5 м), на побережье Белого и Баренцева морей, во Франции (Бретань), Великобритании (Северн), Ирландии, Австралии. Приливные энергоустановки характеризуются большими капитальными затратами. Капитальные затраты на строительство ПЭС могут быть снижены решением комплексных хозяйственных задач: одновременным строительством дорог вдоль дамб, улучшением условий судоходства, снижением расхода дорогого дизельного топлива и т. д.



Принцип работы приливной электроустановки во многом напоминает работу гидроэлектростанции, за исключением того, что потоки воды не поднимаются и не стекают вниз, а движутся «вперед-назад» под воздействием приливов и отливов. Приливная энергия, в отличие от других разновидностей морской энергии, довольно успешно используется в коммерческих целях в течение продолжительного времени. Так, например крупнейшая приливная электростанция «La Rance» была построена в 1966 г. на месте впадения реки в Атлантический океан в городе Сент-Мало в северной Франции (рис. 6.4). Во время прилива водная масса направляется на лопасти турбинного генератора, а при отливе устремляется обратно в океан. Мощность электростанции «La Rance» составляет 240 тыс. кВт. За последние 15-20 лет похожие установки были построены в Китае, Канаде и России.



Рис. 6.4. Приливная электростанция Ла Ранс

### 6.3. Преобразование тепловой энергии океана

Солнечная энергия, поглощенная океаном, преобразуется в тепло, причем, верхние слои воды нагреваются больше нижних придонных слоев на 18–22 °С. «Горячая» вода на поверхности океана имеет температуру около 30 °С, «холодная» вода на дне – 8–10 °С. Преобразование тепловой энергии океана в электрическую возможно с помощью тепловой машины, использующей перепад температур между поверхностными и глубинными водами океана, рис. 5.5.

Рабочая жидкость тепловой машины циркулирует по замкнутому контуру, отбирает тепло от «горячей» воды в теплообменнике 8 испарителя, в паровой фазе приводит в действие турбину 2 и электрический генератор 3, а затем конденсируется в охлаждаемом холодной водой конденсаторе 4. Из-за низкого температурного перепада и низкой температуры «горячей» воды в качестве рабочей жидкости применяют фреон или аммиак, имеющие низкую точку кипения.

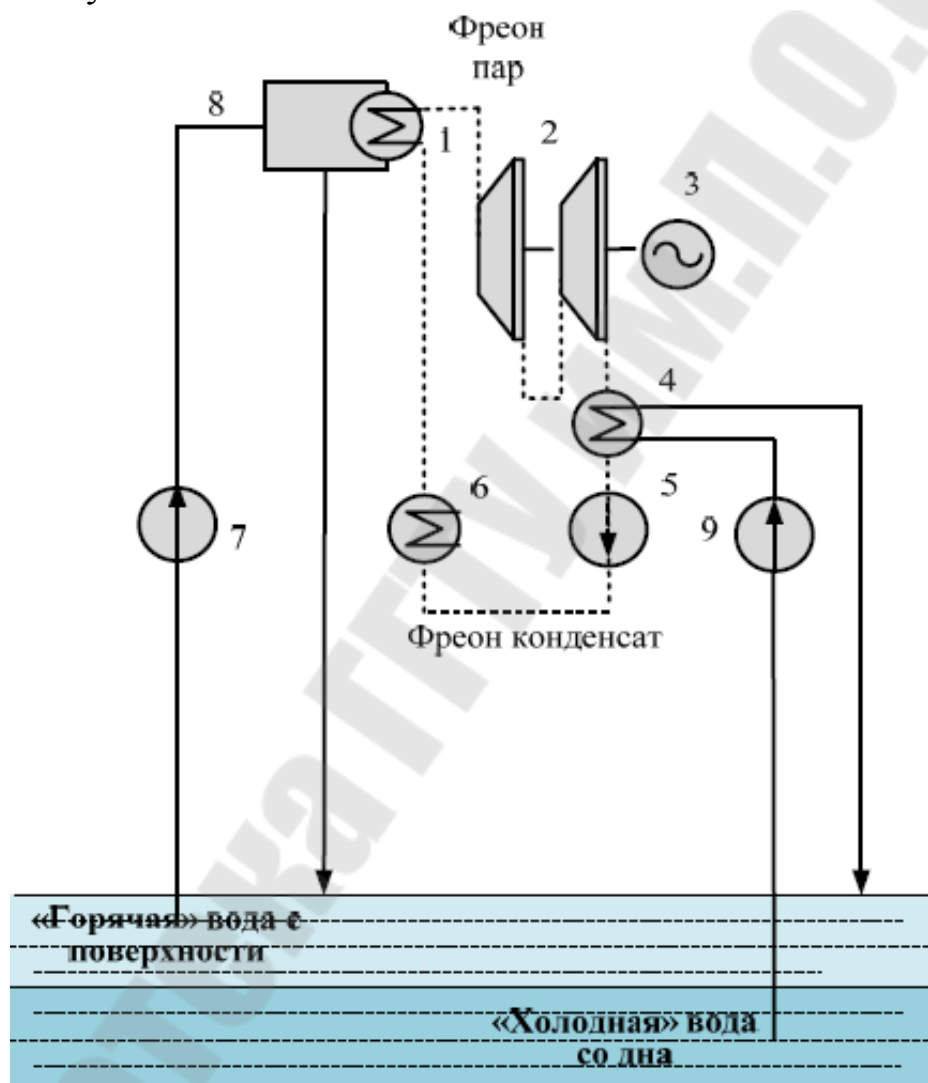


Рис. 6.5. Использование тепловой энергии океана для производства электроэнергии:

1, 8 – теплообменник-парогенератор, передающий тепло «горячей воды» фреону; 2 – паровая турбина, работающая на парах фреона; 3 – электрический генератор, 4 – конденсатор, в котором происходит конденсация фреона с отбором тепла «холодной» водой; 5 – конденсатный насос; 6 – подогреватель питательного фреона; 7 – насос «горячей» воды; 9 – насос «холодной» воды

Хорошие условия для строительства океанической тепловой электростанции существуют на Гавайских островах, вблизи полуострова Флорида, США, а также вблизи острова Науру (центральная часть Тихого океана, 0° северной широты, 166° восточной долготы). В 1000 м от берега глубина океана уже 700 м, а температурный перепад составляет 22 °С. Электростанция может быть установлена на берегу, а не в океане. Судя по детальным характеристикам этого места, здесь создана экспериментальная океанская термальна́я станция мощностью 1000 кВт. По имеющимся данным удельные затраты на строительство такой станции составляют до 40 000 долл. на 1 кВт установленной мощности и размеры установки значительны.

В реальных условиях теплообмена не все тепло «горячей» воды передается рабочей жидкости из-за низкой теплопроводности морской воды, большого сопротивления теплопередаче в теплообменнике. Трубопроводы холодной воды подвергаются воздействию волн, течений и собственного веса, особенно если станция располагается на плавучей платформе в открытом море. В этом случае существуют также сложности в соединении станции с берегом (длинные высоковольтные кабели). Мощность насосов затрачивается на преодоление сил сопротивления в самом трубопроводе и на подъем воды над уровнем океана. Для преодоления сопротивления трубопровода длиной 1000 м и диаметром 1 м при расходе воды 0,5 м<sup>3</sup>/с в станции мощностью 1000 кВт, при перепаде температур 20 °С нужна мощность насосов всего 5 кВт. Если эта вода поднимается к теплообменнику, расположенному на высоте  $H$  над уровнем океана, нужна дополнительная мощность 5 кВт на каждый метр подъема. На это также расходуется мощность самой станции (собственные нужды).

Океанические тепловые электростанции создаются и в Арктике. Арктические станции используют в качестве «горячего» источника тепла воду из океана, в качестве холодного источника – морозный воздух. Рабочим телом в основном контуре станции служит фреон, пары которого приводят в движение турбину с электрогенератором слоя накипи, биообрастаний. Поэтому расход воды и размеры теплообменников – значительно больше, чем в идеальном случае.

## 7. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Геотермальная энергия это внутренняя энергия земных недр, обусловленная ядерными и химическими реакциями, происходящими в ядре Земли, с выделением огромного количества тепла. Внутренняя структура Земли содержит: рис. 7.1.

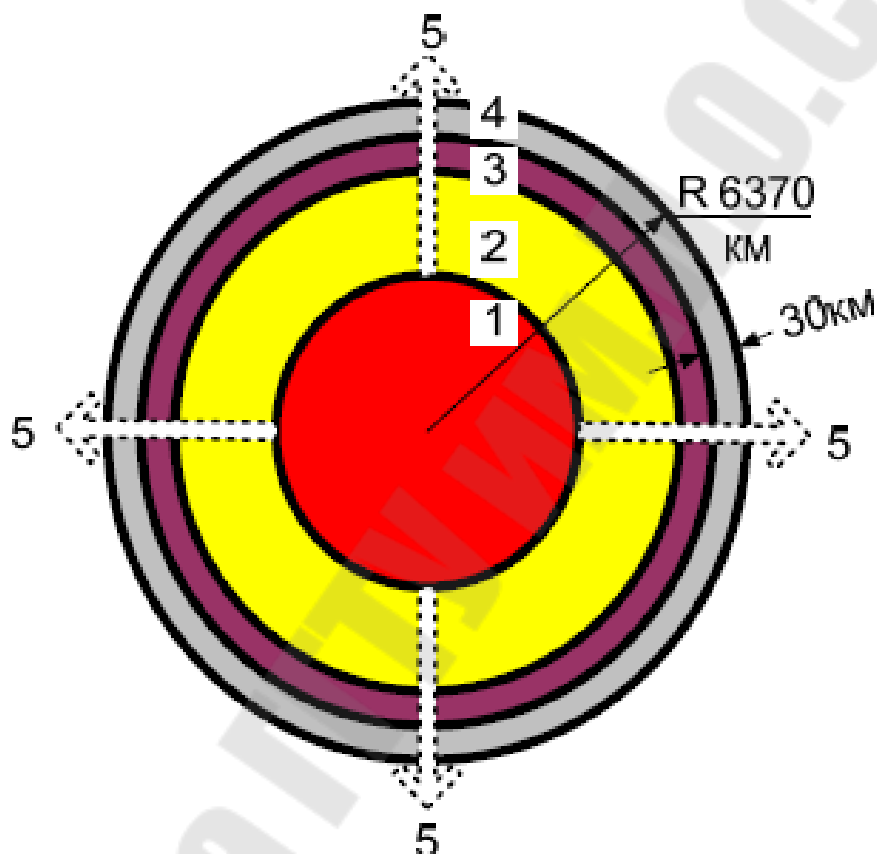


Рис. 7.1. Внутренняя структура Земли и поток геотермальной энергии:

- 1 – раскаленное внутреннее ядро; 2 – наружное ядро; 3 – мантия;  
4 – кора Земли

Земная кора получает тепло от раскаленного предположительно до 5500-6700 °С ядра, где происходят эти реакции. Разность температур между внешней и внутренней поверхностями земной коры около 1000 °С. Кора состоит из твердых пород и имеет невысокую теплопроводность. Геотермальный поток 5 через нее в среднем 0,06 Вт/м<sup>2</sup> при температурном градиенте 30 °С/км. Выход тепла через твердые породы суши и океанского дна происходит за счет теплопроводности (геотермальное тепло) и в виде конвективных потоков расплавленной магмы или горячей воды. В районах с

повышенными градиентами температуры эти потоки составляют 10–20 Вт/м<sup>2</sup> и там могут быть созданы геотермальные энергетические (электрические) станции (Гео ТЭС).

Температурный градиент повышается в зонах с плохо проводящими тепло или насыщенными водой породами. Особенно высокое тепловое взаимодействие мантии с корой наблюдается по границам материковых платформ. В этих районах велик потенциал геотермальной энергии. Градиент температуры достигает 100 °С/км. Это районы с повышенной сейсмичностью, с вулканами, гейзерами, горячими ключами. Такими районами являются: Камчатка в России, Калифорния (Сакраменто) в США, а также зоны в Новой Зеландии, Италии, Мексике, Японии, Филиппинах, Сальвадоре, Исландии и других странах.

Сведения о геотермальных структурах получают при геологической съемке, проходке шахт, скважин (при глубоком бурении – 6 км и более). Технология бурения скважин до 15 км остается такой же, как и до 6 км, поэтому при строительстве Гео ТЭС эта проблема может считаться решенной.

Геотермальные районы подразделяют на 3 класса:

– гипертермальные с температурным градиентом более 80 °С/км расположены в зонах вблизи границ континентальных платформ (Тоскана в Италии);

– полутермальные (40–80 °С/км) расположены вдали от границ платформ, но связаны с аномалиями, например, глубокими естественными водоносными пластами или раздробленными сухими породами (район Парижа);

– нормальные – менее 40 °С/км, где тепловые потоки составляют 0,06 Вт/м<sup>2</sup>. В этих районах извлечение геотермального тепла – пока нецелесообразно.

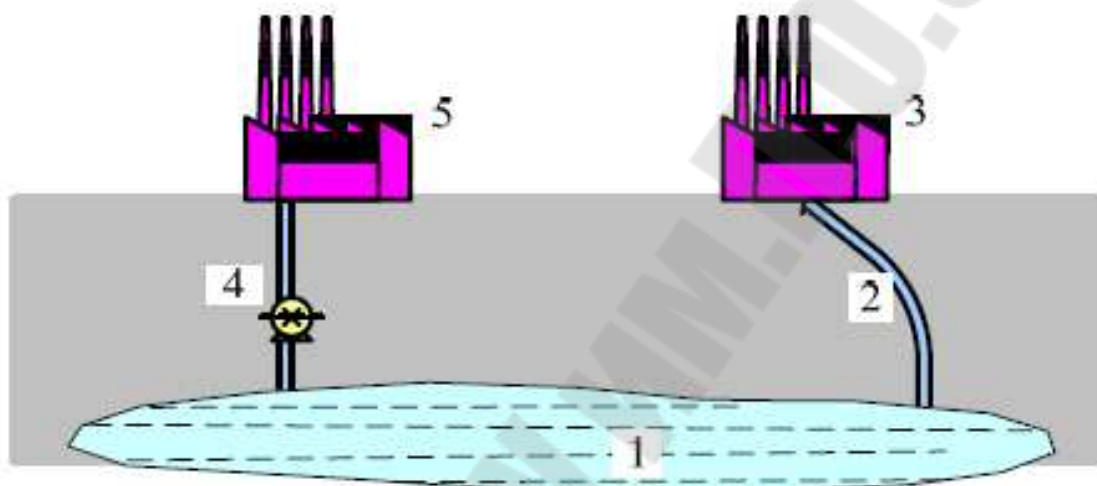
Тепло получается благодаря:

1) естественной гидротермальной циркуляции, при которой вода проникает в глубокие слои, нагревается, превращается в сухой пар, пароводяную смесь или просто нагревается и образует гейзеры, горячие источники;

2) искусственному перегреву, связанному с подачей воды в нагретые слои коры с охлаждением застывающей лавы и охлаждению сухих скальных пород.

Сухие скальные породы в течение миллионов лет накапливали тепло. Отбор тепла от них возможен прокачкой воды через искусственно созданные разрывы, скважины и др.

Созданные ГеоТЭС работают на естественной гидротермальной циркуляции (рис. 7.2), а также на искусственном перегреве за счет извлечения тепла из сухих скальных пород. Геотермальные энергостанции располагаются в гипертермальных районах, вблизи естественных гейзеров и пароводяных источников.



*Рис. 7.2.* Использование потока геотермальной энергии: 1 – источник с температурой воды и пара 200–280 °С; 2 – естественный выход тепла; 3 – энергостанция; 4 – специально пробуренная скважина; 5 – энергостанция

Геотермальная энергия обладает низкими термодинамическими свойствами. Это энергия низкого качества (35 %) и низкой плотности (0,06 Вт/м<sup>2</sup>), с низкой температурой теплоносителя. Наилучший способ ее использования – комбинированное применение для обогрева и выработки электроэнергии. При потребности в тепле с температурой до 100 °С целесообразно ее использовать только для обогрева, если температура теплоносителя ниже 150 °С. При температуре теплоносителя 300 °С и выше целесообразно ее комбинированное использование. Тепло целесообразно использовать вблизи места добычи, для обогрева жилищ и промышленных зданий, особенно в зонах холодного климата. Такие геотермальные системы используются, например, в Исландии. Тепло также используется для обогрева теплиц, сушки пищевых продуктов и т. д. Применение геотермальной энергии определяется капитальными затратами на

сооружение скважин. Их стоимость существенно возрастает с увеличением глубины бурения.

Общее количество тепла, извлекаемого от теплоносителя, может быть увеличено за счет повторной закачки в скважины, тем более что нежелательно оставлять на поверхности эти сильно минерализованные воды по экологическим причинам.

Схема извлечения тепла из сухих горных пород для отопления здания или группы зданий представлена на рис. 7.3. Скала на глубине пробуренной скважины дробится гидровзрывом с помощью холодной воды, нагнетаемой под давлением в скважину. После предварительного дробления пород вода нагнетается через нагнетательную скважину, фильтруется через скальные породы в глубине при температуре 200-280 °С, нагревается, а теплая вода возвращается на поверхность через водозаборную скважину и подается в систему отопления. Отработанная вода насосом 4 возвращается обратно в подземный источник.

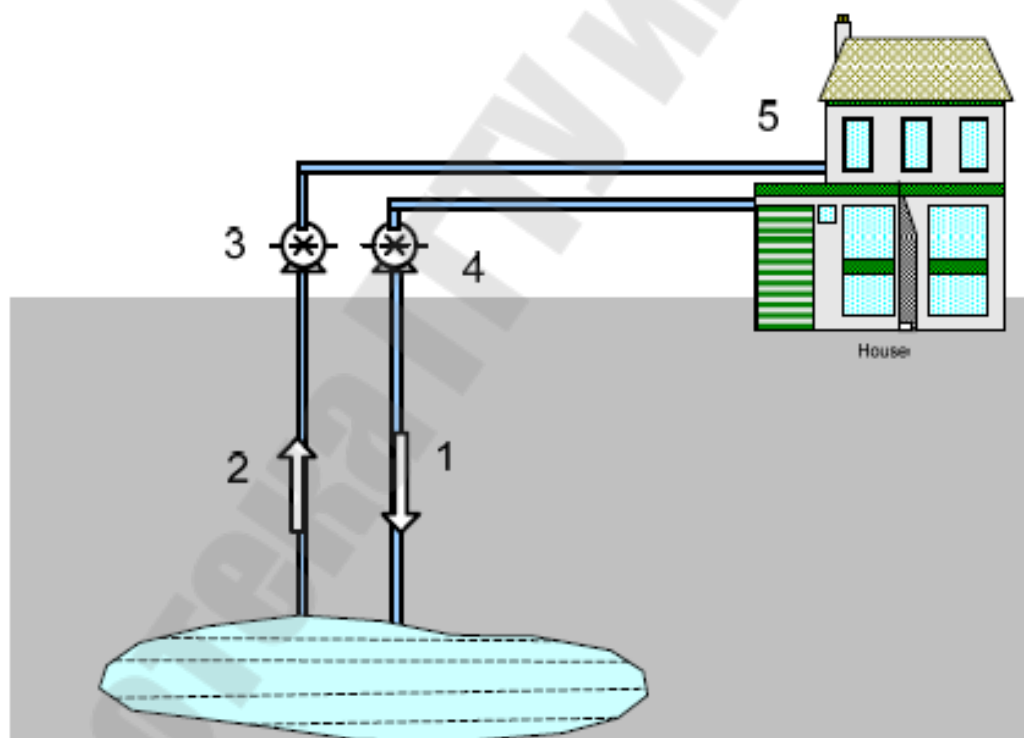


Рис. 7.3. Схема извлечения тепла из сухих горных пород:  
1 – нагнетательная скважина; 2 – водозаборная скважина; 3, 4 – насосы; 5 – отопляемые здания

Электроэнергия из геотермальной энергии может быть получена по схеме двухконтурного теплового двигателя или теплового двигателя с прямым паровым циклом.

Двухконтурный тепловой двигатель показан на рис. 7.4. При использовании низкотемпературного геотермального источника для приведения в действие турбины в турбинном контуре вместо воды применяют жидкости с более низкой температурой парообразования, например, фреон или аммиак. Особые трудности возникают с теплообменниками из-за высокой концентрации химических веществ в воде из скважин.

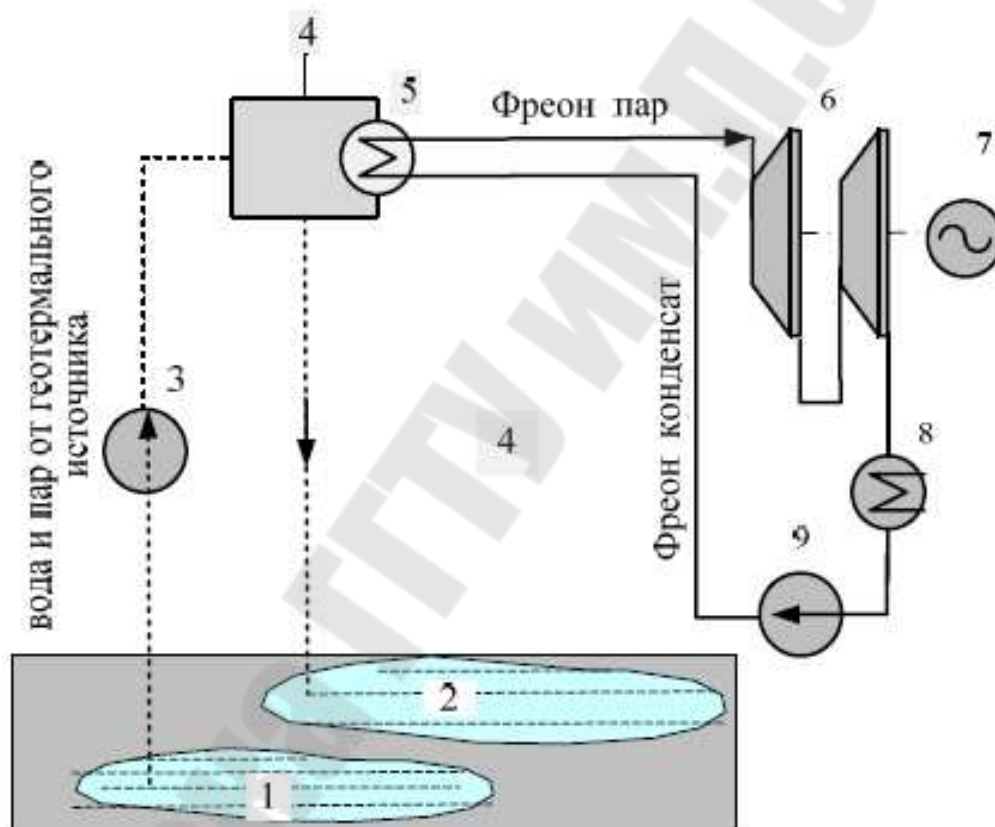


Рис. 7.4. Использование геотермальной энергии для производства электроэнергии в двухконтурном тепловом двигателе:

1 – геотермальный источник; 2 – подземная полость для слива отработанной воды; 3 – насос для подачи воды и пара; 4, 5 – теплообменник (парогенератор), где геотермальное тепло передается фреону, нагревает и испаряет его; 6 – турбина; 7 – генератор; 8 – конденсатор; 9 – конденсатный насос

Схема теплового двигателя с прямым паровым циклом представлена на рис. 7.5. Она содержит: насос, пароводяной сепаратор, турбину, генератор, конденсатор, конденсатный насос.



Вода с паром от геотермального источника подается в пароводяной сепаратор, где пар отделяется от воды и поступает в турбину. Вода возвращается под землю. Отработанный в турбине пар конденсируется, и конденсат также закачивается под землю.

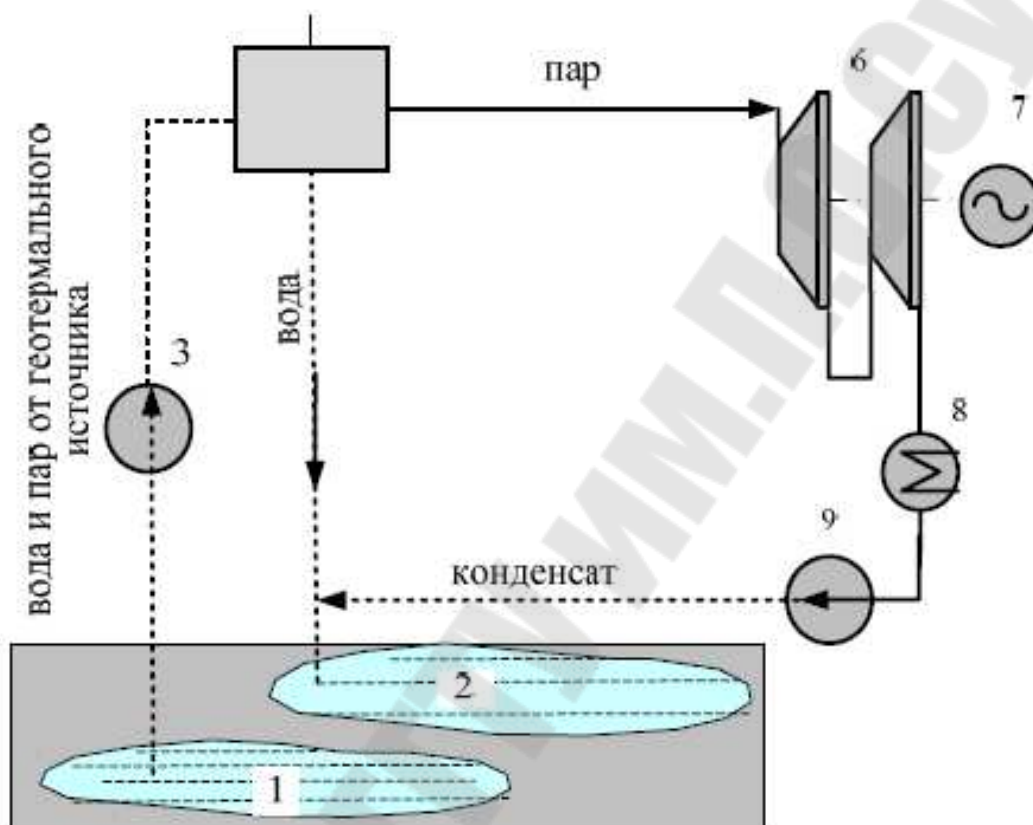


Рис. 7.5. Использование геотермальной энергии для производства электроэнергии в тепловом двигателе с прямым паровым циклом:

- 1 – геотермальный источник; 3 – насос для подачи пара и воды;  
 4 – пароводяной сепаратор; 6 – турбина; 7 – генератор; 8 –  
 конденсатор; 9 – конденсатный насос

## 8. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГИЯ

**Водородная энергетика** основана на использовании водорода для аккумуляции, транспортировки и потребления энергии в производстве, на транспорте, в быту. Водород – наиболее распространенный элемент на Земле и в космосе с высокой теплотой сгорания. Продукт сгорания водорода – вода.

Водород является самым простым элементом космического пространства. Из этого простого элемента состоит 90 % всей исследованной части Вселенной. Водород бесцветен, не имеет запаха, не ядовит и в 14,4 раза легче воздуха. При температуре – 252,77 °С он переходит в жидкое состояние. Он является основным источником энергии во всей Вселенной. Водород не встречается в природе в виде свободного элемента, а является частью сложных элементов, и в первую очередь воды. Водород имеет максимальный объем энергии на единицу массы среди всех известных видов топлива

<b>Наименование топлива</b>	<b>Теплота сгорания, МДж/кг</b>
водород	120,9
бензин	47
этиловый спирт C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	30
метан CH <sub>4</sub>	55

Водород – очень чистый источник энергии. При использовании водорода для получения тепла или электроэнергии продуктом горения является вода или водяной пар.

Водород может использоваться как самостоятельное топливо для двигателей внутреннего сгорания или как присадка к углеводородному топливу, а также как компонент топливных элементов.

Как самостоятельное топливо водород в смеси с воздухом имеет высокую скорость сгорания и отличается трудно контролируемым процессом воспламенения и чрезмерно высоким максимальным давлением. Самовоспламенение в дизеле не происходит. Требуется применение запальной порции углеводородного топлива. Экологическая чистота водородного топлива при этом ухудшается.

Применение водорода как присадки к обычному углеводородному топливу улучшает характеристики топлива,

повышает его энергосодержание, уменьшает выбросы углекислого газа и других вредных веществ, но не устраняет их полностью.

Водород, а точнее его изотопы дейтерий и тритий, могут использоваться как топливо для получения энергии в термоядерных реакциях в термоядерных реакторах. Но это применение водорода не является предметом рассмотрения нашего курса. Также как применение ядерных реакций в атомных электростанциях. Выход энергии в термоядерных энергоустановках огромен, запасы водорода бесконечны, но существует постоянная опасность выхода этих установок и процессов из-под контроля, возникновения радиоактивного загрязнения, катастроф, опасности для жизни на планете. Кроме того, до настоящего времени управляемый термоядерный синтез еще не осуществлен в промышленных масштабах.

### **8.1. Производство водорода**

Процесс химического преобразования топлива с целью получения водорода называется реформингом, а соответствующее устройство - реформером. После реформинга дальнейшая промышленная обработка, подготовка водорода к использованию (сжатие) происходит в процессе компримирования.

***Производство водорода из природного газа.*** Водяной пар при температуре 700-1000 °С смешивается с метаном под давлением в присутствии катализатора.

***Производство водорода из угля путем его газификации.*** Уголь нагревают в газогенераторе до температуры 800-1300 °С без доступа воздуха. Первый газогенератор был построен в Великобритании в 40-х г. XIX века. США предполагают построить электростанцию, которая будет работать на продуктах газификации угля. Мощность станции должна составить 275 МВт. Электричество будут вырабатывать топливные элементы, используя в качестве горючего водород, получающийся в процессе газификации угля.

***Производство водорода из атомной энергии.*** Использование атомной энергии для производства водорода возможно в химических процессах, процессах электролиза воды и высокотемпературного электролиза. Ведутся работы по созданию атомных электростанций нового поколения, обеспечивающих попутное производство водорода. По прогнозам, один энергоблок такой атомной

электростанции будет производить ежедневно водород, эквивалентный 750000 литров бензина.

**Производство электролитического водорода** основано на процессе разложения воды постоянным электрическим током на ее составные части – водород и кислород. Электрический ток через ячейку электролизера переносится заряженными частицами – ионами. Чистая вода, в которой ионов очень мало, обладает ничтожной электропроводностью, и подвергать ее непосредственно электролизу нельзя. В качестве электролита используется водный раствор щелочи, например гидроксида калия (KOH). В растворе щелочи при разложении воды, образуется много частиц – положительно заряженных ионов щелочного металла (калия) и отрицательно заряженных гидроксильных ионов. Первые называются катионами, потому что под влиянием электрического поля направляются к катоду, вторые – анионами. Чем больше в растворе заряженных частиц, тем легче он проводит ток, тем меньше его электрическое сопротивление. При прохождении постоянного тока на стороне катода выделяется водород, на стороне анода – кислород. На электродах происходит распад молекул по следующей схеме:

на катоде	$4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2 + 4\text{OH}^-$
на аноде	$4\text{OH}^- + 4\text{e}^- = \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

В результате электролиза у катода происходит концентрирование гидрата калия, а у анода – разбавление электролита образующейся водой. Ион калия не разряжается на катоде, являясь только переносчиком тока. Водород из воды получают также при высокотемпературном нагреве. При этом электрический потенциал, необходимый для разложения воды, снижается. В качестве электролита для получения водорода может быть морская вода. Сложность возникает из-за выделения хлора на «кислородном» электроде. Чистый водород можно получить, если поддерживать на электролизной ячейке напряжение 1,8 В, но это снижает плотность и ведет к увеличению площади электродов. Эффективность электролиза составляет 60 % из-за образования пузырьков газа вблизи электродов, которые препятствуют перемещению ионов и увеличивают электрическое сопротивление. Применение в качестве электродов пористых материалов увеличивает эффективность электролиза до 80 %.

Из электролизеров водород и кислород поступают вместе с электролитом в разделительные колонки. Электролит охлаждается и возвращается в электролизеры.

Газы из колонок поступают в регуляторы-промыватели или регуляторы давления, которые соединены между собой в нижней части. Выше регуляторов устанавливаются уравнивательные баки, из которых самотеком вода поступает в жидкостную систему регуляторов давления.

Электролит готовят в баке и насосом закачивают в электролизер.

После электролизерной установки водород и кислород поступают на очистку и осушку, хранение в емкостях, компремирование и наполнение в баллоны, а также на сжижение и далее потребителю. Преимущество электрохимического способа получения водорода – простота и непрерывность технологического процесса, экологическая безопасность, отсутствие потребности в сырье, получение водорода высокой чистоты (очистка только от кислорода).

**Получение водорода из биомассы.** Водород из биомассы получается термохимическим или биохимическим способом. При термохимическом методе (пиролизе) биомассу нагревают без доступа кислорода до температуры 500–800 °С (для отходов древесины), что намного ниже температуры процесса газификации угля. В результате процесса выделяется  $H_2$ ,  $CO$  и  $CH_4$ . Современные установки производят электричество из биомассы с КПД более 30 %. В биохимическом процессе водород вырабатывают анаэробные бактерии.

**Другие способы получения водорода.** В настоящее время исследуется получение водорода путем использования некоторых видов водорослей, которые фотосинтезируют водород.

Водород широко применяется в технологических процессах производства бензина и аммиака. В США, например, ежегодно производится около 11 млн т водорода, что достаточно для годового потребления примерно 35-40 млн автомобилей.

На сегодняшний день, однако, в установках промышленного электролиза затраты электроэнергии на получение водорода в 2–3 раза больше, чем может быть получено электроэнергии при сжигании этого водорода. Электроэнергию, полученную при сгорании углеводородного топлива, можно превратить в тепло или в работу.

Тепло, полученное при сгорании водорода полностью ни в электроэнергию, ни в работу превратить невозможно. Получение водорода как топлива пока экономически не выгодно.

## 8.2. Принцип действия топливных элементов

*Топливный элемент* является электрохимическим генератором. Он преобразует химическую энергию топлива (водорода) в электрическую энергию в процессе электрохимической реакции напрямую, в отличие от традиционных технологий, при которых используется сжигание твердого, жидкого и газообразного топлива. Прямое электрохимическое преобразование топлива очень эффективно и привлекательно с точки зрения экологии, поскольку в процессе работы выделяется минимальное количество загрязняющих веществ, а также отсутствуют сильные шумы и вибрации.

Существует три типа топливных элементов:

- топливный элемент с полимерной протонообменной мембраной;
- метаноловый топливный элемент прямого действия;
- твердооксидный топливный элемент.

Внешне топливный элемент напоминает обычную гальваническую батарею. Отличие заключается в том, что изначально батарея заряжена, т. е. заполнена «топливом». В процессе работы «топливо» расходуется, и батарея разряжается. В отличие от батареи топливный элемент для производства электрической энергии использует топливо, подаваемое от внешнего источника. Для производства электрической энергии может использоваться не только чистый водород, но и другое водородосодержащее сырье, например, природный газ, аммиак, метанол или бензин. В качестве источника кислорода, также необходимого для реакции, используется воздух. При использовании чистого водорода в качестве топлива продуктами реакции помимо электрической энергии являются тепло и вода (или водяной пар), т. е. в атмосферу не выбрасываются газы, вызывающие загрязнение воздушной среды или вызывающие парниковый эффект. Если в качестве топлива используется водородосодержащее сырье, например, метанол или природный газ, побочным продуктом реакции будут и другие газы, например, окислы углерода и азота, однако их количество значительно ниже, чем при сжигании такого же количества природного газа. Процесс химического преобразования

топлива с целью получения водорода называется реформингом, а соответствующее устройство - реформером.

Рассмотрим принцип действия топливного элемента на примере простейшего топливного элемента с протонообменной мембраной, рис. 8.1.

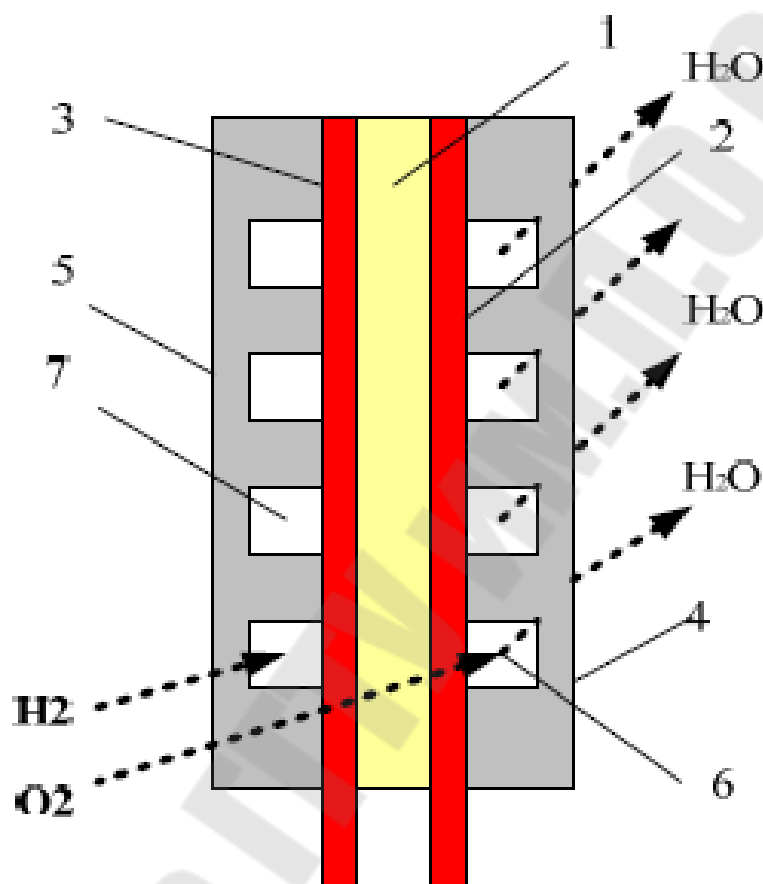


Рис. 8.1. Схема топливного элемента с протонообменной мембраной:

1 – полимерная мембрана; 2 – анод с анодным катализатором (по отношению к внешней электрической цепи); 3 – катод катодным катализатором; 4 – металлическая пластина; 5 – металлическая пластина, подводящая молекулы водорода к аноду по каналам; 6, 7 – металлическая пластина, подводящая кислород к катоду через каналы и отводящая тепло, воду и электрическую энергию

Такой элемент состоит из полимерной мембраны 1, помещенной между катодом (по отношению к внешней электрической цепи) 3 и анодом 2 с катодным и анодным катализаторами. Протонообменная мембрана представляет собой тонкую твердую пластину из органического полимерного материала. Она работает как электролит:

разделяет вещество на положительно и отрицательно заряженные ионы. На аноде происходит окислительный процесс, а на катоде – восстановительный. Анод и катод сделаны из пористого материала, представляющего собой смесь частичек углерода и платины. Платина выступает в роли катализатора, способствующего протеканию реакции диссоциации молекул. Анод и катод выполнены пористыми для свободного прохождения сквозь них водорода и кислорода соответственно. Анод и катод помещены между двумя металлическими пластинами 4 и 5, которые подводят к катоду водород, а к аноду кислород, а отводят тепло и воду, а также электрическую энергию. Молекулы водорода сквозь каналы 7 в пластине 5 поступают на катод 2, где происходит разложение молекул на отдельные атомы. Затем в присутствии катализатора атомы водорода, отдавая каждый по одному электрону  $e^-$ , превращаются в положительно заряженные ионы водорода  $H^+$ , т. е. протоны. Протоны через мембрану диффундируют к аноду, а поток электронов направляется к аноду через внешнюю электрическую цепь, к которой подключена нагрузка (потребитель электрической энергии). Кислород, подается на анод через каналы 6 пластины 4, и в присутствии катализатора вступает в химическую реакцию с ионами водорода из протонообменной мембраны и электронами из внешней электрической цепи. В результате химической реакции образуется вода. Поток электронов во внешней цепи представляет собой постоянный ток, который является током нагрузки. Размыкание внешней цепи или прекращение движения ионов водорода останавливает химическую реакцию. Реакции

на катоде	$H_2 = 2 e^- + 2H^+$
на аноде	$4H^+ + 4 e^- + O^2 = 2H_2O$

Водород, используемый в качестве топлива в топливном элементе, получают предварительно в процессе реформинга и заправляют в топливный бак. Вместо кислорода чаще всего используют воздух.

Количество электрической энергии, производимой топливным элементом, зависит от типа топливного элемента, геометрических размеров, температуры, давления газа. Отдельный топливный элемент обеспечивает ЭДС 0,6 В (по другим данным – до 1,1 В). Для



получения нужного напряжения и тока топливные элементы соединяют в батареи и модули.

В топливном элементе часть энергии химической реакции выделяется в виде тепла.

Принцип действия метанолового топливного элемента прямого действия и твердооксидного топливного элемента – аналогичен. Метаноловый топливный элемент прямого действия работает на смеси метанола и воды. Он является разновидностью топливного элемента с протонообменной мембраной, в котором топливо, метанол, предварительно не разлагается с выделением водорода, а напрямую поступает в топливный элемент. Работа топливных элементов этого типа основана на реакции окисления метанола на катализаторе в двуокись углерода. Вода выделяется на катоде. Протоны ( $H^+$ ) проходят через протонообменную мембрану к катоду, где они реагируют с кислородом и образуют воду. Электроны проходят через внешнюю цепь от катода к аноду, снабжая энергией внешнюю нагрузку. Ток во внешней электрической цепи при этом протекает от анода к катоду. Реакции

на катоде	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$
на аноде	$1,5O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$

Поскольку метанол поступает в топливный элемент напрямую, каталитический реформинг (разложение метанола) не нужен. Хранить метанол гораздо проще, чем водород, поскольку нет необходимости поддерживать высокое давление, так как метанол при атмосферном давлении является жидкостью. Энергетическая емкость (количество энергии в данном объеме) у метанола выше, чем в таком же объеме сильно сжатого водорода.

Метанол ядовит, поэтому использование этих топливных элементов в бытовой технике может быть опасным. Необходимость применения платиновых катализаторов существенно удорожает топливные элементы и получаемую от них электрическую и тепловую энергию.

Твердооксидные топливные элементы используют различные виды топлива, содержащие метан и водород. Химическая реакция в топливных элементах других типов (например, с кислотным электролитом, в качестве которого используется раствор

ортофосфорной кислоты  $H_3PO_4$ ) идентична химической реакции в топливном элементе с протонообменной мембраной.

**Область применения топливных элементов:** стационарные установки, портативные установки, микроустройства, мобильные установки.

**Стационарные установки** номинальной мощностью 5-250 кВт используются как автономные источники тепло- и электроснабжения жилых, общественных и промышленных зданий, источники бесперебойного питания, резервные и аварийные источники электроснабжения. Домашние комбинированные (электричество + тепло) установки имеют высокий КПД, малые выбросы  $CO_2$ , легко могут быть встроены в существующую инфраструктуру. Такая энергетическая установка компактна и может работать на природном газе.

**Портативные установки** мощностью 1-50 кВт используются как источники питания дорожных указателей, автомобильных и железнодорожных холодильников, инвалидных колясок.

**Мобильные установки** мощностью 25-150 кВт применяются для привода автомобилей. Опытные образцы автомобилей и автобусов созданы фирмами «Daimler-Crysler», «FIAT», «Ford», «General Motors», «Honda», «Hyundai», «Nissan», «Toyota», «Volkswagen», ВАЗ, «MAN», «Neoplan», «Renault». Предполагается внедрение их в других транспортных средствах, военных кораблях, подводных лодках. Машины на водородных топливных элементах имеют массу преимуществ перед электромобилями и обычными бензиновыми авто. Это отсутствие вредных выбросов, большой запас хода, чем у электрических, и большая мощность. Кроме того, на сегодняшний день самый дешевый источник водорода – это природный газ. При производстве водорода из природного газа выбросы диоксида углерода в два раза меньше, чем выбросы от автомобилей с бензиновым двигателем. В отличие от аккумулятора топливный элемент вырабатывает электричество из водорода. Внутри топливного элемента находится катализатор из платины, который способствует реакции между водородом и кислородом. В ходе реакции вырабатывается электроэнергия и побочный продукт – водяной пар.

**Микроустройства мощностью 1–500 Вт** используются в мобильных телефонах, карманных компьютерах, различных бытовых электронных устройствах. Возможно химическое аккумулялирование

водорода в виде металлгидридов, из которых он затем извлекается при нагревании до 50 °С, что удобно в эксплуатации и позволяет хранить большие запасы водорода. Металлогидрид FeTiH<sub>1,7</sub> при нагревании выделяет H<sub>2</sub>, а в самом гидриде содержание водорода уменьшается. Эта реакция обратима, поэтому гидридные аккумуляторы можно подзаряжать на заправочных станциях. При зарядке выделяется тепло, которое можно использовать в местных теплосетях. Гидридные аккумуляторы могут быть использованы как топливные баки. Водород можно передавать по трубопроводам или использовать непосредственно для получения электроэнергии в топливных элементах.

***Факторы, сдерживающие внедрение водородных технологий:***

- отсутствие водородной инфраструктуры;
- несовершенные технологии хранения водорода;
- отсутствие стандартов безопасности, хранения, транспортировки, применения большого объема топливных баков по сравнению с бензином;
- опасность использования водорода как топлива из-за высокой летучести, легкости воспламенения и возможности взрыва в смеси с воздухом;
- сложность водородного двигателя внутреннего сгорания и сложность его обслуживания;
- отсутствие опыта эксплуатации водородного транспорта;
- сложность быстрой дозаправки в пути, отсутствие сети заправочных станций;
- высокая летучесть водорода затрудняет его хранение в жидком виде, транспортировку и использование в баке;
- при производстве водорода расходуется дорогая электроэнергия, производимая на тепловых, атомных и других электростанциях путем сжигания топлива с выбросом парниковых газов, окислов серы и т. д.;
- затраты электроэнергии на производство водорода значительно превышают количество электроэнергии, которое можно получить при его сжигании.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Олешкевич, М.М. Нетрадиционные источники энергии: учебно-методическое пособие / М.М.Олешкевич. – Минск: БНТУ, 2016. – 205 с.
2. Ермашкевич, В.Н. Возобновляемые источники энергии Беларуси: прогноз, механизмы реализации: Учебное пособие / В.Н. Ермашкевич, Ю.Н. Румянцева. – Минск: НО ООО «БИП-С», 2004. – 121 с.
3. Коваленко, Э.П. Возобновляемые источники энергии и возможности использования в Беларуси / Э.П.Коваленко. – Минск, 1995. – 137 с.
4. Сибкин, Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие / Ю. Д. Сибкин. – Москва: КНОРУС, 2010. – 232 с.
5. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
6. Алхасов, А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии / А.Б.Алхасов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
7. Баранов, Н. Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии / Н.Н. Баранов. – Москва: Изд-во МЭИ, 2012. – 384 с.
8. Безруких, П.П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология / П.П. Безруких – М.: Колос, 2008. – 196 с.
9. Берман, Э. Геотермальная энергия / Э. Берман. Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 192 с.
10. Вавилов, А.В. Малая энергетика на биотопливе / А.В. Вавилов, Г.И. Жихар, Л.П. Падалко и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2002. – 248 с.
11. да Роза, А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: Учебное пособие / А. да Роза. Пер. с англ. под редакцией С.П. Малышенко, О.С. Попеля. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; М.: Издательский дом МЭИ; 2010. – 704 с.
12. Каралюнец, А.В. Основы инженерной экологии. Термические методы обращения с отходами / А.В. Каралюнец, Т.Н. Маслова, В.Т. Медведев – М.: МЭИ, 2000. – 80с.
13. Коробков, В.А. Преобразование энергии океана / В.А. Коробков. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 343 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ПОНЯТИЕ О ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ И НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ .....	1
1.1. Принципы и технические проблемы использования альтернативных источников энергии .....	6
1.2. Энергетика Беларуси .....	9
2. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА .....	13
2.1. Происхождение ветра, ветровые зоны РБ.....	13
2.2. Запасы энергии ветра и возможности ее использования. 15	
2.3. Классификация ветроэнергетических установок .....	17
2.4. Основные узлы и системы ветроустановок .....	23
2.5. Перспективы ветроэнергетики в Беларуси .....	26
3. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА .....	29
3.1. Характеристики солнечного излучения .....	29
3.2. Солнечные нагревательные системы .....	30
3.3. Солнечные системы для получения электроэнергии на основе термодинамического принципа .....	36
3.4. Фотоэлектрические генераторы.....	40
4. БИОЭНЕРГЕТИКА.....	45
4.1. Биомасса как источник энергии.....	45
4.2. Прямое сжигание и пиролиз.....	45
4.3. Спиртовая ферментация .....	48
4.4. Анаэробное сбраживание .....	49
4.5. Схемы переработки ТБО .....	53
5. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА.....	58
5.1. Общие сведения .....	58
5.2. Гидроэнергетика Беларуси.....	66
6. ЭНЕРГИЯ ОКЕАНОВ .....	68
6.1. Энергия волн .....	68
6.2. Энергия приливов .....	70
6.3. Преобразование тепловой энергии океана.....	73

7. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ.....	76
8. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГИЯ .....	82
8.1. Производство водорода .....	83
8.2. Принцип действия топливных элементов.....	86
ЛИТЕРАТУРА.....	92

# **АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

**ПОСОБИЕ**

**для студентов специальности  
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

Составитель **Никулина** Татьяна Николаевна

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 30.03.21.

Рег. № 46Е.

<http://www.gstu.by>