

А.Б. Сухоцкий, В.Н. Фарафонов



---

# НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

---

---

А.Б. Сухоцкий, В.Н. Фарафонов

# НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Курс лекций

Минск • БГАТУ • 2009

УДК 620.9(042.4)  
ББК 31.15я73  
С 91

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент НАН Беларуси,  
зав. лабораторией дисперсных систем ИТМО им. А. В. Лыкова  
*В. А. Бородуля;*  
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ЮНЕСКО  
«Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» БНТУ  
*Ю. К. Кривошеев*

**Сухоцкий, А. Б.**

С 91 Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : курс лекций для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / А. Б. Сухоцкий, В. Н. Фарафонов. – Минск : БГТУ, 2009. – 246 с.  
ISBN 978-985-434-882-7.

Курс лекций содержат теоретические сведения, основные понятия и определения, рисунки и схемы, необходимые студентам, чтобы обеспечить понимание и усвоение основных принципов использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии; знакомит с основными схемами переработки и утилизации энергии, конструкциями наиболее распространенных типов устройств и машин, используемых в области нетрадиционной энергетики.

УДК 620.9(042.4)  
ББК 31.15я73

ISBN 978-985-434-882-7 © УО «Белорусский государственный технологический университет», 2009  
© Сухоцкий А. Б., Фарафонов В. Н., 2009

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Озабоченность проблемами энергетики будущего вполне естественна, поскольку энергия является основой для жизнедеятельности человечества. Энергия необходима для обогрева, производства и приготовления пищи, создания товаров. Поскольку человечество развивается, растет спрос людей на услуги, следовательно, будет продолжаться рост потребности в энергии.

Популярные в XX столетии источники энергии (нефть, газ, уголь) являются промежуточными на данном этапе развития человечества. Эти источники накопили в себе энергию в течение длительного промежутка времени (нескольких миллионов лет) задолго до появления человечества. Расходование за последние 60 лет значительного количества органического топлива привело к резкому выбросу в окружающую среду избыточной тепловой энергии и углекислого газа, что способствовало изменению экологии Земли (опустынивание, эрозия почв, уничтожение некоторых видов растений и животных, «озоновые дыры», парниковый эффект, отравление рек, водных бассейнов). Кроме того, эти органические ресурсы возобновляются очень медленно и, следовательно, могут закончиться в обозримом будущем.

В последние десятилетия исследования атмосферы ясно показывают, что количество диоксида углерода в ней значительно возросло. И этот процесс ускоряется. Вследствие изменения состава атмосферы температура Земли постепенно повышается. Поскольку обычная температура планеты растет только на несколько десятых градуса ежегодно, обыкновенные люди не могут «чувствовать» ее повышение. Однако это изменение температуры активно влияет на климат Земли.

Существует конкурирующая теория, которая объясняет процесс глобального потепления активностью Солнца. Две конкурирующие теории являются важной основой для политических противоречий. Те, кто заинтересованы в использовании ископаемых видов топлива (угля, нефти и природного газа), предпочитают «объяснение активности Солнца», поскольку это не приведет к негативным последствиям для их деловой деятельности. К еще одной важной группе людей, которая поддерживает «солнечную теорию», относятся политические круги, поскольку высокое потребление ископаемых видов топлива ведет к значительным доходам. Однако активность Солнца не может дать объяснения долгосрочному процессу глобального потепления. Сегодня подавляющее большинство ученых согласно с тем, что потепление

Земли обусловлено деятельностью людей, а именно потреблением угля, нефти, бензина, газа (ископаемых видов топлива) в любых формах.

Существует фундаментальная разница между углеродом в биомассе и углеродом в ископаемых топливах. Углерод в ископаемых видах топлива собирается из подземельных слоев и сожженный в котле выбрасывается в виде углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) в атмосферу. Это означает, что ископаемое топливо, накопленное в течение нескольких миллионов лет, перемещается из под земли и преобразуется в  $\text{CO}_2$  (и большое количество других субстанций).

Путь углерода, сжигаемого в биомассе, выглядит иначе. Когда дерево растет, оно поглощает  $\text{CO}_2$  из атмосферы для того, чтобы создать свою древесную субстанцию. Когда дерево сжигается (или же если дерево остается гнить в лесу), углерод уходит обратно в атмосферу. Дерево поэтому поглощает  $\text{CO}_2$ , когда растет и отдает обратно такое же количество атмосфере, когда оно сгнивает или сжигается. Таким образом,  $\text{CO}_2$  в биомассе нейтрален и не влияет на климат Земли.

Практически неисчерпаемым источником энергии является ядерная энергия. Этот источник, скорее всего, будет преобладающим в конце нынешнего столетия, но не единственным. На первый взгляд ядерное топливо – это очень привлекательный источник энергии, поскольку расщепляющиеся (радиоактивные) вещества находятся в очень большом количестве в недрах нашей планеты, и в идеале атомная электростанция – экологически чистый источник энергии. Практически оказалось, что экологическая безопасность АЭС относительна, зависит не только от безукоснительного соблюдения технологических режимов, но и надежности элементов оборудования. Срок службы оборудования АЭС по этой причине в 2–3 раза меньше расчетного; демонтаж, замена элементов этого оборудования более дорогими, чем сооружение новых станций. Практически не решена проблема захоронения радиоактивных отходов и изношенного оборудования радиоактивной зоны. Кроме того, активное использование ядерной энергии приведет к аналогичному, что происходит в последнее время, выбросу в окружающую среду избыточной тепловой энергии.

Логичнее человечеству было бы использовать энергию, участвующую в земных процессах (например, гидроэнергию). Гидроэнергетика – это дешевый, удобный, самый экологически безопасный источник потребности человечества. Аналогичными по происхождению, намного более потенциальными, но более сложными в утилизации являются ветроэнергетика и солнечная энергетика.

Переход к крупномасштабному использованию возобновляемых источников энергии произойдет в XXI столетии. Это связано и с возрастающей потребностью развивающихся стран в энергии (нехватка энергии уже сейчас существует в ряде стран, включая Китай и Индию, а рост населения усугубляет эту проблему). Через 30–40 лет дополнительно потребуются 5000 ГВт установленной мощности, что примерно в 2 раза больше современного уровня.

В данном курсе лекций дается представление обо всем спектре возобновляемых источников энергии, которые можно использовать в современном народном хозяйстве. Многие технологии и устройства утилизации этих источников, изложенных в курсе лекций, находятся в начальной стадии разработок и, возможно, не будут промышленно применяться в этом столетии. Но представленный материал позволит создать общую картину развития энергетики в будущем.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в подборе материала и ценные замечания профессору Кунтышу Владимиру Борисовичу, доценту Дудареву Владимиру Владимировичу, старшим преподавателям Санковичу Евгению Савельевичу и Петровичу Олегу Васильевичу, а также всем сотрудникам кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники Белорусского государственного технологического университета.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.1. Энергия, ее источники и классификация

*Энергия* является мерой способности объекта совершить работу. Известно много видов энергии. Например, тепловая, механическая, электрическая, упругая, излучения, химическая, ядерная, массы.

Существует пять основных источников энергии в пределах планеты Земля:

- 1) солнечное излучение;
- 2) гравитационные взаимодействия (энергия притяжения Луны);
- 3) геотермальные процессы (тепловая энергия ядра Земли);
- 4) ядерные реакции;
- 5) химические реакции.

Возникновение, существование и развитие различных форм жизни на Земле обусловлено наличием солнечного излучения. Вклад Солнца в энергетический баланс Земли в 5 тыс. раз превышает вклад остальных вместе взятых источников энергии. Энергия солнечного излучения на земле в результате естественных процессов преобразуется в различные виды энергоресурсов: продукты фотосинтеза и термической переработки (биомасса, торф, бурый уголь, сланцы, антрацит, нефть, природный газ), движение воздушных масс (ветер), движение воды (реки, океанические течения), электростатическое поле Земли (молнии и другие электростатические разряды атмосферы).

Гравитационные взаимодействия на Земле проявляются в виде перемещения значительных масс воды, которые приводят к океаническим и морским приливам и отливам. Геотермальные процессы обусловлены наличием происходящих с выделением тепла в ядре Земли химических и ядерных реакций. Они проявляются в виде нагретого земляного пласта, температура которого увеличивается при приближении к ядру Земли, а также в виде нагрева подземных вод (например, гейзеры).

Особым видом энергетических ресурсов являются расщепляющиеся с выделением энергии вещества (радиоактивные и химические), находящиеся в недрах нашей планеты. Эти вещества образовались на Земле с появлением планеты и при их использовании в дальнейшем самопроизвольно не восстановятся. Наибольшей энергоемкостью обладает ядерное топливо. При этом запасы его на Земле настолько велики, что их хватит человечеству минимум на несколько столетий.

Источники энергии подразделяются на возобновляемые и невозобновляемые (истощаемые).

*Возобновляемые источники энергии* – это источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих (период возникновения менее 100 лет) в окружающей среде потоков энергии (биотопливо, энергия ветра, гидроэнергия, геотермальная и гравитационная энергия).

*Невозобновляемые источники энергии* – это естественно образовавшиеся и накопившиеся в недрах планеты запасы веществ, способные при определенных условиях высвободить заключенную в них энергию. Это все виды ископаемого топлива (торф, сланцы, уголь, нефть, газ), а также ядерная и химическая энергия.

Энергия невозобновляемых источников в отличие от возобновляемых находится в природе в связанном состоянии и освобождается в результате целенаправленных действий человека.

Источники энергии также делят на традиционные и нетрадиционные. *Традиционные источники энергии* – это источники, по технологиям переработки которых накоплен богатый опыт и имеются специалисты (в настоящее время это газ, нефть, уголь, гидроэнергетика, ядерная энергетика).

## **1.2. Современное состояние топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь**

Топливо-энергетический комплекс – это отрасль народного хозяйства, которая включает системы добычи, транспортировки, хранения, производства и распределения всех видов энергоносителей. От уровня развития и эффективности функционирования топливно-энергетического комплекса в значительной мере зависит благополучие страны.

В народном хозяйстве Республики Беларусь используются различные виды топлив (табл. 1.1), однако основными являются природный газ и продукты нефтепереработки.

Таблица 1.1

### **Потребление Республикой Беларусь энергетических ресурсов в 2005 году**

Энергетический ресурс	Потребление, млн. т у. т.
Природный газ	23,3
Продукты нефтепереработки (мазут, бензин, дизельное, топливо, керосин, газ)	15,2
Уголь	0,8
Торф	0,9
Прочие виды (дрова, отходы и др.)	1,4
<i>Итого</i>	41,6



Основные объемы энергоресурсов поставляются из других стран – России (нефть, газ), Украины (уголь), Польши (уголь). Из потребляемых энергоресурсов только 4,8 млн. т у. т. (11,5%) в 2005 году являлись местными (табл. 1.2).

Таблица 1.2

**Потребление Республикой Беларусь  
местных энергетических ресурсов в 2005 году**

Местный энергетический ресурс	Потребление, млн. т у. т.
Нефть	2,2
Попутный газ	0,3
Дрова и отходы	1,3
Торф	0,9
Гидро-, ветро- и солнечная энергетика	0,1
<i>Итого</i>	4,8

Страна обеспечивает свою энергонезависимость в том случае, если удельный вес собственных энергоресурсов составляет 25% и более (например, в Германии – 45%, Франции – 45%, Бельгии – 20%, Дании 59%, Швеции – 63%). Для обеспечения энергонезависимости правительством Республики Беларусь принято ряд программ, которые должны быть завершены к 2010 году и имеют три основных направления:

- повышение эффективности использования энергии;
- развитие и повышение эффективности использования местных органических топлив;
- развитие энергетики на возобновляемых источниках энергии.

Кроме того, правительством принято решение о диверсификации энергоресурсов, т. е. снижении в общем объеме потребления природного газа и мазута за счет увеличения потребления угля и развития собственной атомной энергетики.

Возможный технический потенциал местных органических энергоресурсов представлен в табл. 1.3. Рассмотрим, насколько целесообразна утилизация этих ресурсов.

Разведанные месторождения нефти на территории Беларуси сосредоточены в нефтегазоносной области – Припятской впадине, площадь которой составляет около 30 тыс. км<sup>2</sup>. Изученные запасы нефти весьма ограничены (их хватит не более чем на 30 лет). Согласно анализу динамики нефтедобычи как в мире, так и в республике, после достигнутого максимального уровня отмечается резкий спад нефтедобычи. Это происходит из-за того, что основные наиболее крупные месторождения нефти, обеспечившие достигнутые уровни добычи, по-

степенно истощались, а запасы по вновь открываемым небольшим залежам не восполняли объемы извлекаемой нефти. Кроме того, спад усугубляется ростом доли в общем объеме добычи трудноизвлекаемой нефти, добыча которой из недр требует применения новых дорогостоящих технологий. При этом значительно снижается экономическая эффективность ее добычи.

Таблица 1.3

**Возможный технический потенциал  
органических энергоресурсов Республики Беларусь**

Местный органический энергетический ресурс	Потенциал, млн. т у. т.
Нефть	94,0
Попутный газ	9,3
Торф	124,0
Бурый уголь	36,3
Горючие сланцы	792,0
<i>Итого</i>	1055,6

Для того чтобы стабилизировать добычу нефти и создать предпосылки для ее роста, требуется резко увеличить ресурсно-сырьевую базу путем открытия новых месторождений с запасами, превышающими объемы нефтеизвлечения.

В Республике Беларусь перспективными в нефтегазовом отношении кроме Припятского прогиба являются Оршанская и Подляско-Брестская впадины. Однако промышленная нефтеносность установлена только в Припятском прогибе. Перспективы Оршанской и Подляско-Брестской впадин весьма проблематичны и однозначно пока не определены. Так как в прогибе крупные месторождения нефти уже открыты и эксплуатируются, а объективные предпосылки увеличения добычи в настоящее время отсутствуют, то в основу расчета прогнозных показателей добычи положен принцип максимально возможного замедления темпов падения уровня добычи нефти и его стабилизации.

В Республики Беларусь утилизируется брикетный (~80%), а также фрезерный и кусковой торф. Как и древесина, торф является возобновляющимся минеральным топливом: ежегодный прирост увеличивает запасы 1 га залежи на 1–2 т сухого торфа. Увеличение добычи возможно за счет менее энергоэффективного (~2 раза) по сравнению с брикетным кускового торфа. Причем крупные месторождения торфа в республике уже освоены, поэтому увеличение его добычи возможно только за счет применения новых технологий при использовании небольших торфяных залежей мобильными торфозаводами.

Известно три месторождения бурых углей – Житковичское, Бриневское и Тонезское с общим запасом 151,6 млн. т и два месторождения сланцев – Туровское и Любанское общим запасом 11 млрд. т. Потенциал бурых углей и, особенно, горючих сланцев в Беларуси очень высок. Однако эти топлива низкоэффективные. Теплота сгорания бурых углей составляет 6,0–6,8 МДж/кг, а сланцев – 4,0–6,0 МДж/кг (например, теплота сгорания качественного угля ~23,0 МДж/кг). Это обусловлено тем, что бурые угли имеют большую влажность (55–60%), а сланцы большую зольность (~75%). Разработка угольных месторождений возможна открытым способом, однако в ближайшей перспективе не рекомендована республиканской экологической комиссией, поскольку в результате вынужденного резкого снижения грунтовых вод возможный экологический ущерб из-за гибели лесных угодий, рыбных прудов, снижения урожайности сельхозугодий, запыленности территорий значительно превысит получаемые выгоды. Использование бурых углей и сланцев возможно при осуществлении предварительной термической их обработки. При этом стоимость полученных энергоносителей будет примерно равна мировым ценам на нефть.

Возможный технический потенциал возобновляемых источников энергии Республики Беларусь представлен в табл. 1.4.

Таблица 1.4

**Возможный технический потенциал  
органических энергоресурсов Республики Беларусь**

Возобновляемый источник энергии	Потенциал, млн. т у. т./год
Древесное топливо и отходы деревообработки	2,7
Отходы гидролизного производства (лигнин)	0,3
Растительная масса и биоэнергетика	2,26
Топливо-бытовые отходы	0,47
Гидроэнергия	0,64
Энергия Солнца	0,6
Энергия ветра	0,67
<i>Итого</i>	7,64

**1.3. Особенности использования  
возобновляемых источников энергии**

При оценке возможности использования возобновляемых источников энергии необходимо представлять их принципиальные отличия от традиционных источников. Сравнение источников можно провести

по следующим параметрам: регулируемость энергопотока, качество энергии, плотность энергии, воздействие на окружающую среду, безопасность.

**Регулируемость энергопотока** – это возможность управления подачей потока в утилизирующую установку. Прежде всего, необходимо понимать, что традиционные топлива (уголь, нефть, газ) являются аккумуляторами солнечной и геотермальной энергии, накопленной в них за миллионы лет. Потребность общества в энергии, как правило, не постоянно во времени. Например, в электроэнергии потребность максимальна утром и вечером, минимальна ночью. Предприятия, использующие традиционные источники энергии (тепловые электростанции, котельные) могут легко подстраиваться под эти колебания спроса на энергию, регулируя расход топлива. Регулировать же подачу возобновляемых источников энергии (кроме биотоплива и гидроэнергии) невозможно. Именно по этой причине использование угля, нефти и газа стало традиционной энергетикой в XX столетии. Решить проблему регулирования энергопотока могло бы функционирование мощных аккумуляторов энергии, которые бы накапливали уже преобразованную энергию и выдавали ее потребителю по мере необходимости. Однако в настоящее время таких аккумуляторов нет.

Под **качеством источника энергии** понимают долю энергии, которая может быть преобразована в механическую работу. Распространенные и перспективные источники имеют следующие ориентировочные значения этого критерия: тепло сжигаемого топлива 30–45%; электроэнергия – 95%; энергия ветра – 30%, гидроэнергия – 80%; древесная масса – 35%; тепловая энергия Солнца – 35%; электрическая энергия Солнца – 10–5%.

Как видно, из возобновляемых источников самая эффективная по этому параметру является гидроэнергия.

**Плотность энергии** – это количество производимой энергии на  $1 \text{ м}^2$  занимаемой энергоустановкой площади. Возобновляемые источники характеризуются низкой плотностью энергии – около  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Для невозобновляемых источников она намного выше: паровых котлов –  $100 \text{ кВт/м}^2$ , ядерных реакторов –  $1000 \text{ кВт/м}^2$ .

Из-за низкой плотности энергии возобновляемые источники перспективнее внедрять в сельской местности, где имеется больше свободных площадей.

**Воздействие на окружающую среду** (механическое и тепловое загрязнение) возобновляемых источников минимально, так как они

использует потоки энергии, уже существующие в окружающем пространстве. По экологическим показателям возобновляемые источники намного эффективнее традиционных топлив. Исключением может быть только несовершенная технология сжигания древесной массы. Однако имеются экологические недостатки и у возобновляемых источников энергии: нарушение естественного ландшафта (гидроэнергетика, ветроэнергетика), нарушение путей миграции птиц (ветроэнергетика), создание электростатических и магнитных полей (ветроэнергетика), занятие сельскохозяйственных площадей (биоэнергетика).

**Безопасность** – это уровень процессов и явлений, отрицательно воздействующих на человека. Использование энергии возобновляемых источников намного безопаснее, чем, например, использование энергии органических топлив или радиоактивных элементов. Это обусловлено, прежде всего, низкой плотностью энергии возобновляемых источников.

## 2. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Солнечные технологии должны стать конкурентоспособными в ближайшие двадцать лет при соответствующей общественной и финансовой поддержке. В настоящее время создано свыше 600 разновидностей солнечных энергетических систем, наибольшее количество которых предназначено для нагрева воды в целях ее использования для хозяйственно-бытовых нужд и теплоснабжения, в частности для обогрева зданий и сооружений.

Было бы несправедливым утверждать, что гелиоэнергетика – это удел лишь «солнечных» областей земного шара. Республика Беларусь находится в одинаковых условиях солнечной освещенности со Швецией и Финляндией, занимающими ведущие позиции в мировой гелиоэнергетике, а по годовому приходу и интенсивности солнечной радиации значительно выигрывает у Англии и Западной Германии, лидирующих в Европе по производству солнечных водонагревателей.

### 2.1. Солнечное излучение

#### 2.1.1. Космическое солнечное излучение

Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция – каждую секунду на Солнце примерно  $6 \cdot 10^{11}$  кг водорода превращается в гелий. При этом Солнце уменьшается на  $G = 4000$  кг/с, что, согласно формуле Эйнштейна, приводит к выделению энергии  $Q = Gc^2 = 4 \cdot 10^{20}$  Дж/с, где  $c$  – скорость света. (Полная масса Солнца  $2 \cdot 10^{30}$  кг). При этом в направлении Земли движется только  $1,2 \cdot 10^{17}$  Дж/с энергии. Но это в 1600 раз больше энергии, которую потребляют люди на Земле.

Излучение характеризуется следующими параметрами.

1. *Поток излучения,  $Q$ , Дж/с, Вт*, – величина, равная энергии, переносимой электромагнитными волнами за одну секунду через произвольную поверхность.

2. *Плотность потока излучения,  $E$ , Вт/м<sup>2</sup>*, – интегральный поток излучения, переносимый через единицу поверхности:

$$E = dQ/dS.$$

3. *Интенсивность излучения,  $I$ , Вт/(м<sup>2</sup>·мкм)*, – плотность потока излучения тела для рассматриваемого интервала длин волн  $d\lambda$ :

$$I = dE/d\lambda.$$

4. *Облученность*,  $H$ , Дж/м<sup>2</sup>, – поток излучения, падающий на единицу поверхности за определенный промежуток времени  $dt$ :

$$H = \int E dt.$$

5. *Световой поток*,  $\Phi$  – часть потока излучения, воспринимаемый человеческим глазом (т. е. поток излучения, относимый к видимому диапазону длин волн  $0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$ ). Единицей измерения светового потока является люмен (лм). Световой поток в 1 лм белого света равен  $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$  ( $1 \text{ Вт} = 217 \text{ лм}$ ).

6. *Освещенность (плотность светового потока)*,  $E_c$  – световой поток, падающий на единицу поверхности. Освещенность измеряется в люксах (лк).  $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$ . Для белого света  $1 \text{ лк} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$  ( $1 \text{ Вт/м}^2 = 217 \text{ лк}$ ). Для потока света от лампы накаливания  $1 \text{ лк} = 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ . Приборы, предназначенные для измерения освещенности, называются люксметрами.

Основная часть солнечной энергии испускается в виде коротковолнового электромагнитного излучения в диапазоне длин волн  $0,2\text{--}3,0 \text{ мкм}$  (рис. 2.1, кривая 1).

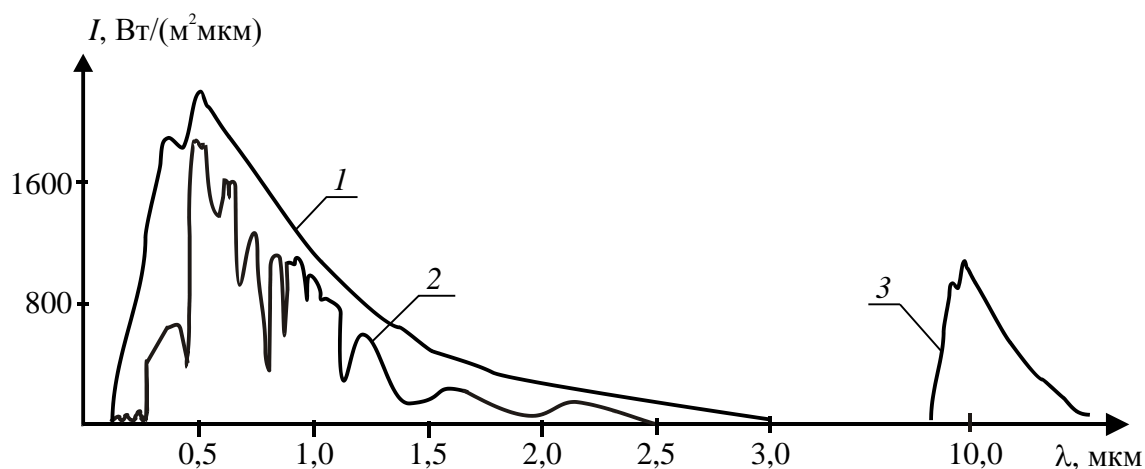


Рис. 2.1. Спектр излучений:

1 – солнечное излучение до атмосферы Земли; 2 – солнечное излучение после атмосферы Земли; 3 – собственное излучение атмосферы Земли

Солнечный спектр до атмосферы Земли можно разделить на три области:

1) ультрафиолетовое излучение ( $\lambda < 0,4 \text{ мкм}$ ) – 9% интенсивности излучения;

2) видимое излучение ( $0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$ ) – 45% интенсивности излучения;

3) инфракрасное излучение ( $\lambda > 0,7 \text{ мкм}$ ) – 46% интенсивности излучения.

Поверхностная плотность потока интегрального излучения абсолютно черного тела описывается законом Стефана – Больцмана

$$E_0 = \sigma_0 T^4,$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $T$  – температура абсолютно черного тела.

Плотность солнечного излучения до атмосферы Земли на перпендикулярную излучению площадку составляет  $E^* = 1353 \text{ Вт/м}^2$  (солнечная константа).

### 2.1.2. Влияние земной атмосферы на солнечное излучение

В процессе прохождения солнечного излучения через атмосферу имеют место различные виды взаимодействия: отражение, рассеяние (изменение направления распространения в зависимости от длины волны), поглощение (переход энергии солнечного излучения в тепло (возбуждение молекул) с последующим излучением света большей длины волны).

**Отражение.** Большую часть солнечного излучения отражают облака, меньшую – снег и лед на поверхности Земли. Плотность оставшегося потока солнечного излучения составляет примерно  $1,0 \text{ кВт/м}^2$ .

**Рассеяние.** Солнечная энергия достигает Земли в виде направленного  $E^{\text{пр}}$  и рассеянного (диффузного)  $E^{\text{рас}}$  лучистых потоков. Рассеивание излучения осуществляется частицами атмосферной пыли, молекулами газов и аэрозолями. Относительное значение интенсивности направленного потока к полной интенсивности излучения  $E = E^{\text{пр}} + E^{\text{рас}}$  меняется от 0,9 до 0 в пасмурный день с плотной облачностью.

Суммарный годовой поток радиации на горизонтальную площадку в Минске составляет  $E_n = 3714 \text{ МДж/м}^2$ , а рассеянный –  $E_n^{\text{рас}} = 8 \text{ МДж/м}^2$ . Рассеянный поток приблизительно в два раза меньше суммарного.

В результате прохождения атмосферы коротковолновое излучение вблизи поверхности Земли (рис. 2.1, кривая 2) можно разделить на следующие области:

1) коротковолновое ультрафиолетовое излучение ( $\lambda < 0,3 \text{ мкм}$ ) – приблизительно 0% интенсивности излучения из-за поглощения молекулами кислорода, озона и их ионами;



2) длинноволновое ультрафиолетовое излучение ( $0,3 \text{ мкм} < \lambda < 0,4 \text{ мкм}$ ) – приблизительно 0,2% интенсивности излучения из-за поглощения молекулами кислорода, озона и их ионами, но достаточное для загара;

3) видимое излучение ( $0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$ ) – 49% интенсивности излучения. Чистая атмосфера практически полностью пропускает видимое излучение. Однако наличие аэрозолей и загрязнений атмосферы могут значительно проглотить данное излучение;

4) коротковолновое инфракрасное излучение ( $0,7 \text{ мкм} < \lambda < 2,5 \text{ мкм}$ ) – 50,8% интенсивности излучения. Более 20% солнечной энергии данного излучения поглощается парами и диоксидом углерода  $\text{CO}_2$ ;

5) длинноволновое инфракрасное излучение ( $\lambda > 2,5 \text{ мкм}$ ) – приблизительно 0% интенсивности излучения. В этой области спектра излучения атмосфера практически непрозрачна.

Параметром, отражающим влияние атмосферы на интенсивность излучения, доходящего до земной поверхности, является атмосферная (или воздушная) масса, которая определяется по формуле

$$AM(p) = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{\cos \theta},$$

где  $p$  – атмосферное давление, Па;  $p_0$  – нормальное атмосферное давление,  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $\theta$  – угол между потоком излучения и нормалью к поверхности приемника.

Тогда плотность излучения определяется как  $E = E^* / AM(p)$ , где  $E^* = 1,353 \text{ кВт/м}^2$  – солнечная константа.

**Поглощение.** При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется из-за поглощения инфракрасного излучения парами воды, аэрозолями и оксидом углерода, а также поглощения ультрафиолетового излучения молекулами кислорода, озона и их ионами. Поглощение в атмосфере приводит к повышению температуры, при этом происходит переизлучение электромагнитного потока атмосферой в длинноволновой области от 5 до 25 мкм (рис. 2.1, кривая 3).

Следовательно, общее излучение, падающее на землю можно разделить на три составляющие – коротковолновое прямое, коротковолновое рассеянное и длинноволновое:

$$E = E_{\text{кв}}^{\text{пр}} + E_{\text{кв}}^{\text{рас}} + E_{\text{дв}}.$$

Согласно закону Планка, интенсивность излучения в зависимости от температуры и длины волны имеет вид

$$I_{\lambda} = \frac{3,74 \cdot 10^{-16} \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{1,44 \cdot 10^{-2}}{\lambda \cdot T}\right) - 1}.$$

При этом, согласно закону Вина, спектральная плотность потока излучения имеет максимум на определенной длине волны, которая связана с температурой тела  $T$ :

$$\lambda_{\max} = 0,002898/T.$$

Для солнечного излучения  $\lambda_{\max} \approx 0,5$  мкм (температура Солнца примерно 5800 К), а для атмосферного излучения  $\lambda_{\max} \approx 10$  мкм (температура атмосферы примерно 250 К).

Энергия фотонов излучения с длиной волны  $\lambda$  определяется из соотношения

$$h_{\nu} = h \cdot c / \lambda,$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $6,626196(50) \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $c$  – скорость света,  $2,9979250(10) \cdot 10^8$  м/с;  $\lambda$  – длина волны, мкм.

Из общего количества поступающего на Землю солнечного излучения около 27% вовлекаются в процесс кругооборота воды в природе (т. е. на испарение воды), около 0,2% идет на образование воздушных потоков и океанических течений и только 0,02% захватывается растениями для биологического роста.

**Парниковый эффект.** Атмосфера включает четыре области по высоте (рис. 2.2):

- тропосферу от 0 до 10–12 км с падением температуры до  $-55^{\circ}\text{C}$ ;
- стратосферу от 10–12 до 50–55 км с ростом температуры до  $0^{\circ}\text{C}$ ;
- мезосферу от 50–55 до 80–90 км с падением температуры до  $-90^{\circ}\text{C}$ ;
- термосферу, простирающуюся от 80–90 км до 200–300 км с ростом температуры.

Каждая зона атмосферы завершается областью постоянной температуры: тропопаузой, стратопаузой и мезопаузой. Газы накапливаются в верхних слоях тропосферы и стратосферы. Средняя температура поверхности Земли составляет около  $14^{\circ}\text{C}$ , что примерно на  $40^{\circ}\text{C}$  выше температуры атмосферы. Излучение поверхности Земли происходит в инфракрасном диапазоне, при этом атмосфера является теплоизоляционным экраном – не пропускает инфракрасное излучение в космос, но пропускает коротковолновое солнечное излучение к поверхности Земли. Атмосфера и поверхность Земли нагреваются, пока

уходящие потоки энергии не уравниваются с приходящими. Данное явление представляет собой парниковый эффект, который сопровождается нагревом тропосферы и охлаждением стратосферы.

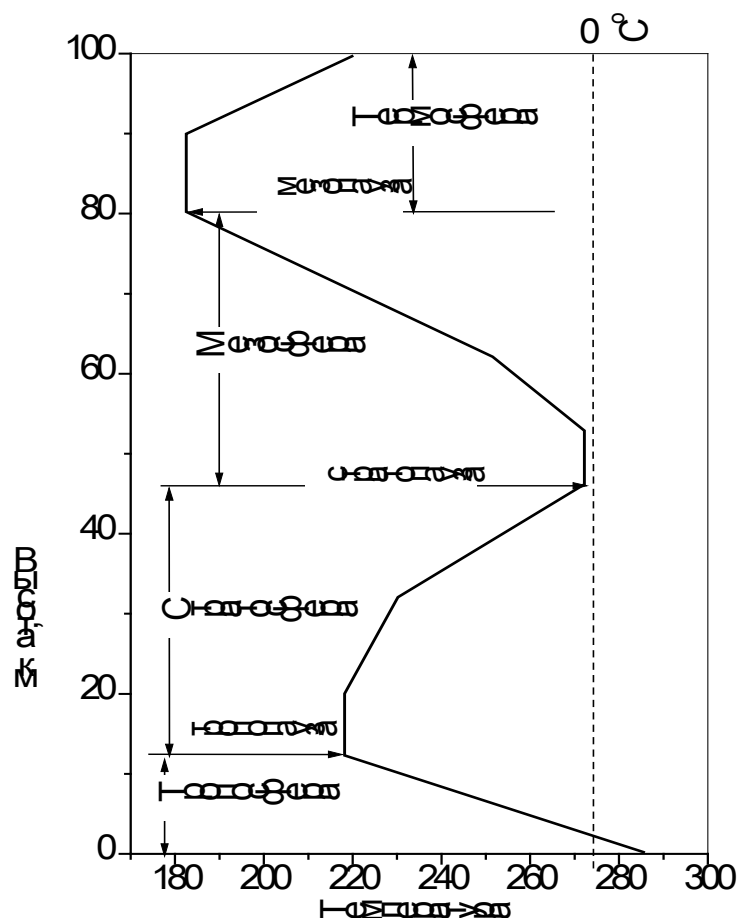


Рис. 2.2. Распределение температуры по высоте атмосферы

Это приводит к тому, что температура убывает от поверхности Земли незначительно (100 м над уровнем Земли уменьшает температуру на  $\sim 0,4^{\circ}\text{C}$ ). Если бы отсутствовал парниковый эффект, то температура убывала бы значительно быстрее — в двух метрах от Земли всегда были бы отрицательные температуры.

Изменение состава атмосферы может привести к значительному изменению распределения температурного поля и, как следствие, к нарушению экологического равновесия Земли.

### 2.1.3. Оптимальная ориентация приемника

Различают нормальные, на горизонтальную и приемную площадки потоки солнечной энергии. Это в равной мере относится как к пря-

тому, так и к рассеянному излучению. Если известна плотность потока  $E_n$  в нормальном направлении, легко определить действительный поток на площадку другой ориентации. Горизонтальную

$$E_{ng} = E_n \cos \theta_z$$

или приемную

$$E_{np} = E_n \cos \theta,$$

где  $\theta_z$  и  $\theta$  – соответственно угол между направлением потока излучения и вертикалью, и нормалью к поверхности приемника.

Облученность солнечным излучением приемника за время  $dt$  представляет собой интегральную сумму всех компонентов излучения:

$$H = \int (E_{\text{кв}}^{\text{пр}} \cos \theta + E_{\text{кв}}^{\text{рас}} + E_{\text{дв}}) dt.$$

Косинус данного угла определяется по формуле

$$\cos \theta = (A - B) \sin \delta + [C \sin \omega + (D + E) \cos \omega] \cos \delta,$$

где  $A = \sin \varphi \cos \beta$ ,  $B = \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma$ ,  $C = \sin \beta \sin \gamma$ ,  $D = \cos \varphi \cos \beta$ ,  $E = \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma$ ;  $\beta$  – угол наклона между приемной площадкой к горизонтальной плоскости (рис. 2.3);  $\gamma$  – азимут, угол между проекцией на горизонтальную плоскость нормали к поверхности приемника и меридианом ( $\gamma = 0$ , если поверхность направлена строго на юг),

$\delta = \delta_0 \sin \left[ 360^\circ \frac{284 + n}{365} \right]$  – склонение, угол между направлением к Солнцу и экваториальной плоскостью,  $\delta_0 = 23,5^\circ$ ,  $n$  – номер дня года ( $\delta = 23,5^\circ$  – 22 июня,  $\delta = -23,5^\circ$  – 22 декабря);  $\omega = 15(t_{\text{сол}} - 12)$  – часовой угол, угол поворота Земли с момента солнечного полдня,  $t_{\text{сол}}$  – солнечное время, ч;  $\varphi$  – широта, на которой находится солнечный приемник.

Если расположить приемник строго на юг ( $\gamma = 0$ ) с наклоном, равным широте ( $\beta = \varphi$ ), то формула определения угла направления солнечного излучения значительно упрощается:

$$\cos \theta = \cos \omega \cos \delta.$$

Желательно приемник делать регулируемым, так чтобы обеспечивать угол падения, равный нулю. Однако поскольку систему поглощения солнечного излучения станет значительно дороже, то экономически целесообразно использовать фиксированное расположение приемника при условии выполнения следующих рекомендаций:

1) расположение приемника нужно выбирать в зависимости от того, когда нужно регулярно получать большой поток тепла – утром или днем;

2) в течение года угол падения в полдень значительно меняется, и возникает необходимость регулировать угол наклона приемника  $\beta$ ;

3) поскольку  $\cos \alpha \approx 1$  при  $-30^\circ < \alpha < 30^\circ$ , то изменение азимута  $\gamma$  или угла наклона  $\beta$  на  $\pm 30^\circ$  слабо повлияет на собранную теплоту.

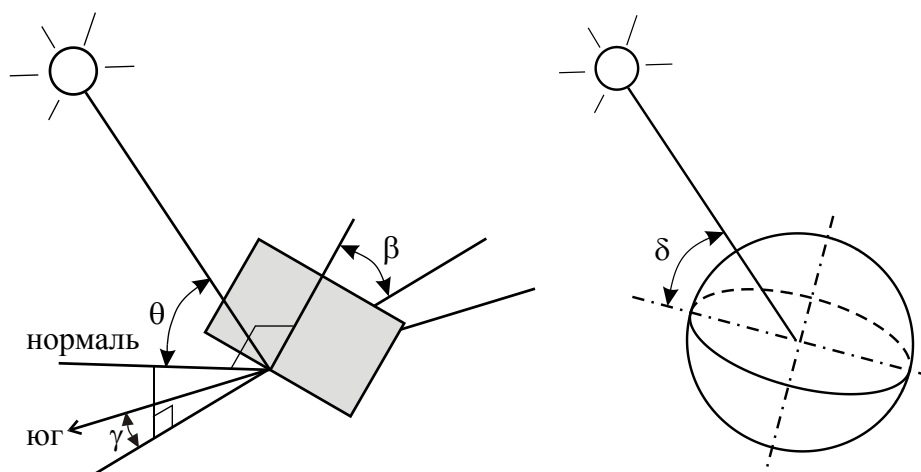


Рис. 2.3. Схема расположения приемника солнечного излучения относительно Солнца и Земли

Установлены оптимальные углы наклона рабочей поверхности коллектора южной ориентации к горизонту: при сезонном использовании (с апреля по сентябрь) –  $39^\circ$ , для зимы –  $73^\circ$ , для лета –  $34^\circ$ , для всего года (при круглогодичном использовании) –  $54^\circ$ . Определены также данные почасовых значений оптимальных углов и азимуты рабочей поверхности при азимутальном слежении за Солнцем. Рекомендуется следящие коллекторы ориентировать на  $10\text{--}15^\circ$  западнее южного направления.

Солнечное излучение характеризуется числом часов солнечного сияния, которое зависит от погодных условий и продолжительности дня между восходом и закатом. Продолжительность солнечного дня можно приблизительно определить по формуле

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta).$$

Для Беларуси ( $54^\circ$  северной широты) продолжительность солнечного дня меняется от 17 ч в период летнего солнцестояния до 7 ч в период зимнего солнцестояния. Продолжительность солнечных часов

в год для Беларуси составляет около 4400 ч. Однако из-за пасмурных погодных условий число часов солнечного сияния в год составляет 1748–1872 ч в зависимости от региона. Тем не менее такая же величина характерна для Швеции, где солнечная энергетика имеет достижения и поддерживается государством. Минимальное число дней без солнца приходится на июль (1–2 дня). Напротив, в декабре их число составляет наибольшее количество (19–22 дня). В среднем в течение года в Беларуси наблюдается 28 ясных дней, 170 дней с переменной облачностью, 167 пасмурных дней.

Наиболее благоприятный период в Беларуси для использования солнечной энергии в гелиосистемах – май – сентябрь. В течение этого периода продолжительность солнечного сияния равна примерно 1200–1400 ч, что составляет 67–71% годовой суммы.

Сравнительный анализ показывает, что Минск по продолжительности солнечного сияния имеет близкие значения, а по приходу среднемесячной солнечной радиации даже превосходит Германию, Швецию и Англию, которые являются европейскими лидерами по выпуску и применению гелиотехнического оборудования.

Достоинства солнечной энергии – это ее неисчерпаемость, даже при небрежном отношении к ней. Недостатки:

- зависимость интенсивности излучения не только от времени суток, времени года, но и от погодных условий.
- слабая плотность солнечного излучения. Например, для Республики Беларусь, чтобы снять потребную для одного человека 2 кВт энергии при КПД = 20%, потребуется около 100 м<sup>2</sup> площади земной поверхности покрыть теплоприемниками. При норме жилой площади на человека 20 м<sup>2</sup>.

Существует пять основных способов использования солнечной энергии:

- тепловой – заключается в подогреве воздуха, воды или материалов (сушка);
- фотоэлектрический – заключается в преобразовании энергии солнечных лучей в электрическую энергию;
- биологический – основывается на способности растений путем фотосинтеза превращать солнечную энергию в химическую;
- химический – заключается в использовании процессов разложения и синтеза веществ под действием солнечных лучей (разложение воды на водород и кислород);
- прямой – для освещения (окна с жалюзи, световой фонарь, специальное остекление, световой люк, коллектор с распределительным световодом).

## 2.2. Тепловой способ использования солнечной энергии

Преобразование солнечной энергии в тепловую обеспечивается за счет способности атомов вещества поглощать электромагнитное излучение. При этом энергия электромагнитного излучения преобразуется в кинетическую энергию атомов и молекул вещества, то есть в тепловую энергию. Результатом этого является повышение температуры тела.

Преобразование солнечной энергии в тепловую обеспечивается **системами солнечного отопления**. Их характерным отличием от других систем отопления является применение специального элемента – гелиоприемника, предназначенного для улавливания солнечной радиации и преобразования ее в тепловую энергию. По способу использования солнечного излучения системы отопления подразделяют на пассивные и активные.

**Пассивными** называются системы солнечного отопления, в которых элементом, воспринимающим солнечное излучение, является само здание или его отдельные ограждения (здание-коллектор, стена-коллектор, кровля-коллектор и т. п. (рис. 2.4)).

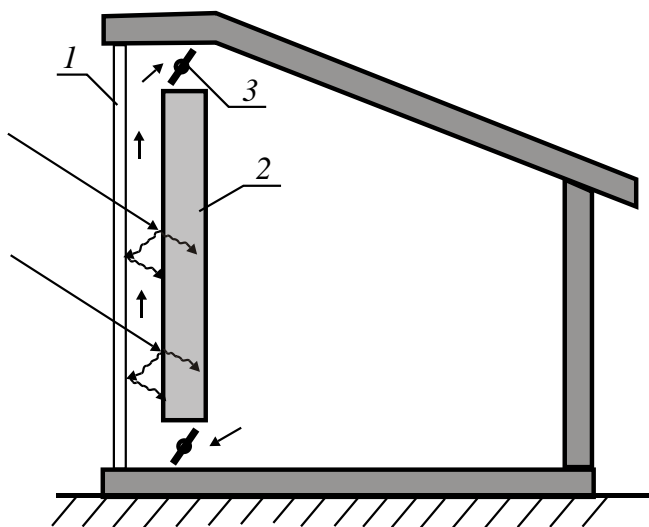


Рис. 2.4. Пассивная низкотемпературная система солнечного отопления с элементом поглощения «стена-коллектор»:

1 – лучепрозрачный экран; 2 – черная лучевоспринимающая стена (аккумулятор); 3 – воздушная заслонка

Идея пассивной отопительной солнечной системы состоит в выборе такой приемной площадки, обращенной к Солнцу, чтобы получить оптимальное количество солнечного тепла для данной строительной конструкции.

Недостатком пассивных солнечных систем является то, что в таком доме может быть слишком жарко в течение дня, но прохладно ночью. На практике пассивные отопительные системы функционируют намного лучше, если осуществляется принудительная циркуляция воздуха с помощью вентиляторов.

**Активными** называются системы солнечного отопления, в которых гелиоприемник (гелиоколлектор) является самостоятельным отдельным устройством, заполненным теплоносителем.

### 2.2.1. Гелиоколлектор

Основным элементом солнечной нагревательной системы является гелиоколлектор, в котором происходит поглощение солнечного излучения и передача энергии теплоносителю. Гелиоколлекторы делятся на плоские и фокусирующие. Наиболее распространенными являются плоские (нефокусирующие) приемники, позволяющие собирать как прямое, так и рассеянное излучение и в силу этого способные работать также и в облачную погоду.

Плоские гелиоколлекторы делятся на простые, содержащие весь объем теплоносителя, и проточные, нагревающие за определенное время только небольшое количество теплоносителя, который затем, как правило, накапливается в отдельном резервуаре. На рис. 2.5 представлены различные варианты приемников солнечного излучения.

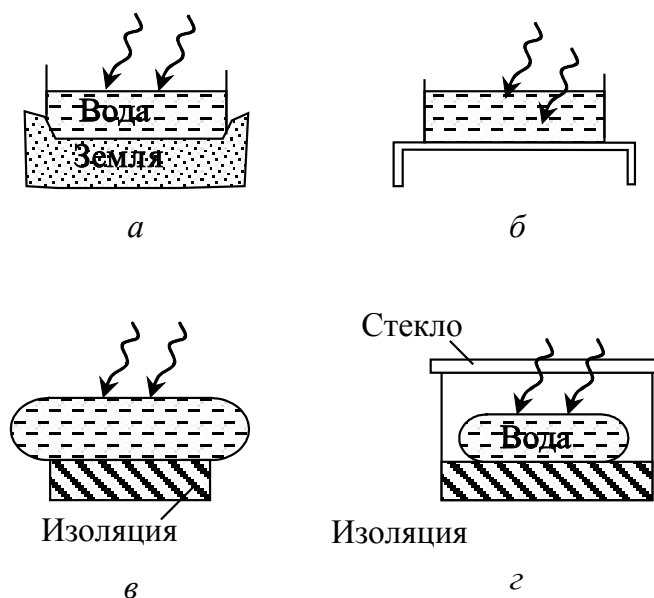


Рис. 2.5. Последовательность приемников солнечного излучения в порядке возрастания их эффективности и стоимости



Простые гелиоколлектора делятся на следующие виды:

- *открытый резервуар на поверхности земли* (рис. 2.5, а) – простейший нагреватель воды (например, бассейн). Повышение температуры воды ограничено высоким коэффициентом отражения ее поверхности, теплоотдачей к земле и воздуху, затратой части поглощенного тепла на испарение воды;

- *открытый резервуар, изолированный от земли* (рис. 2.5, б). Повышение температуры воды ограничено высоким коэффициентом отражения поверхности воды, теплоотдачей воздуху (конвекцией и излучением), теплоотдачей земле, затратой части поглощенного тепла на испарение воды;

- *черный резервуар с теплоизолированным дном* (рис. 2.5, в). Жидкость заключена в емкости с черной матовой поверхностью, обычно располагаемой на крыше здания. Потери тепла на испарение отсутствуют, коэффициент поглощения черной поверхности близок к единице. Нагреватели этого типа достаточно недороги, просты в изготовлении и позволяют нагревать воду до температуры около 45°C. Очень широкое распространение получили в Японии, Израиле. Параметры нагревателя ограничены тепловыми потерями с поверхности, особенно их увеличением в ветреную погоду;

- *закрытый черный гелиоколлектор* (рис. 2.5, г). Для исключения теплоотдачи от приемника в воздух, особенно в ветреную погоду, емкость нагревателя помещается в контейнер с прозрачной для солнечного излучения крышкой. Большинство прозрачных сред пропускают лучи выборочно (селективно), то есть их пропускная способность зависит от длины волны падающего излучения. Лучшим материалом для крышек является стекло, так как оно довольно дешево, имеет коэффициент пропускания излучения в диапазоне 0,5–1 мкм около 0,85 и практически полностью отражает излучение при длине волны более 5 мкм. Следовательно, стекло хорошо пропускает солнечное излучение и практически не пропускает излучение поглощающей панели гелиоколлектора. Единственным недостатком стекла является хрупкость, приводящая к его бою в результате температурных деформаций каркаса гелиоколлектора до 5% в год. Поэтому используются также контейнеры для гелиоколлектора из пластика, имеющие подобные стеклу оптические свойства, но менее хрупкие.

*Проточный гелиоколлектор* представляет собой систему, в которой вода протекает по параллельным трубкам, закрепленным на поглощающей панели (рис. 2.6).

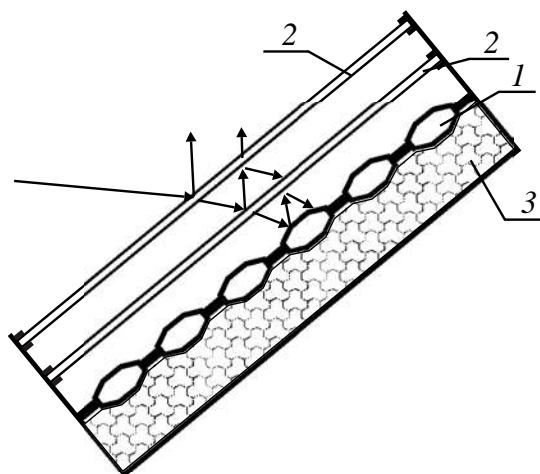


Рис. 2.6. Плоский солнечный коллектор:  
1 – поглощающая панель; 2 – остекление;  
3 – теплоизоляция

Основными элементами плоского проточного солнечного коллектора являются: корпус, где расположена поглощающая панель 1 с каналами для теплоносителя, на поверхность которой нанесено покрытие, обеспечивающее поглощение не менее 90% падающего солнечного излучения; прозрачная теплоизоляция 2, снижающая потери в окружающую среду через верхнюю поверхность коллектора; непрозрачная тепловая изоляция 3, снижающая потери в окружающую среду через днище коллектора и его боковые грани.

В коллекторе падающее солнечное излучение преобразуется в теплоту, отводимую потоком теплоносителя (вода, антифриз, воздух и др.), протекающим по каналам поглощающей панели. Прозрачная изоляция снижает конвективные и лучистые потери теплоты от поглощающей панели в атмосферу, вследствие чего возрастает производительность коллектора. КПД такого коллектора составляет около 70%.

Под действием солнечной радиации тепловоспринимающие панели разогреваются до температуры 70–80°C, превышающей температуру окружающей среды, что ведет к возрастанию конвективной теплоотдачи панели и ее собственного излучения в окружающую среду.

Плоские солнечные коллекторы используют в коммунально-бытовой сфере для горячего водоснабжения и отопления жилых и общественных зданий, в сельскохозяйственном производстве при переработке и хранении продукции, в технологических процессах, требующих невысоких температур (до 100°C), для подогрева воды в плавательных бассейнах.

### 2.2.2. Тепловой баланс гелиоколлектора

Рассмотрим основные параметры, характеризующие взаимодействие тел с излучением.

**Коэффициент поглощения  $\alpha$  (поглощательная способность) тела** – отношение потока излучения, поглощаемого поверхностью тела, к потоку излучения, падающему на эту поверхность.

**Коэффициент отражения  $\rho$  (отражательная способность) тела** – отношение потока излучения, отраженного поверхностью тела, к потоку, падающему на эту поверхность. Для поверхностей, которые рассеивают падающее солнечное излучение, эту величину также называют *альбедо*.

**Коэффициент пропускания  $\tau$  (пропускательная способность) тела** – отношение потока излучения, пропускаемого телом, к потоку, падающему на это тело.

Коэффициенты поглощения, отражения и пропускания зависят от температуры тела, частоты (или длины волны) излучения, а также от природы тела, состояния поверхности тела. Для любого тела

$$\alpha + \rho + \tau = 1.$$

Тело, для которого коэффициент поглощения равен единице, называется абсолютно черным. Оно поглощает все падающее на него излучение.

**Коэффициент излучения  $\varepsilon$  (степень черноты) тела** – отношение потока собственного интегрального излучения данного тела к потоку интегрального излучения абсолютно черного тела при той же температуре.

Суммарный тепловой поток, поступающий к теплоносителю, определяется балансом

$$Q = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{пот}},$$

где  $Q_{\text{погл}}$ ,  $Q_{\text{пот}}$  – поглощенный поток и тепловые потери приемника соответственно.

Поток солнечного излучения, поглощаемого панелью приемника, составляет

$$Q_{\text{погл}} = \tau_{\text{пок}} \cdot \alpha_{\text{п}} \cdot S_{\text{п}} \cdot E,$$

где  $\tau_{\text{пок}}$  – коэффициент пропускания прозрачного покрытия, защищающего приемную поверхность от солнца (0,8–0,9);  $\alpha_{\text{п}}$  – коэффициент поглощения приемной поверхности;  $S_{\text{п}}$  – площадь освещенной поверхности;  $E$  – плотность солнечного потока.

В процессе поглощения температура приемной поверхности повышается. Превышение температуры поглощающей панели  $t_{\text{п}}$  над температурой окружающей среды  $t_{\text{о.с}}$  приводит к потере тепла от приемника:

$$Q_{\text{пот}} = (t_{\text{п}} - t_{\text{о.с}}) / R \cdot S_{\text{п}} = (\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}})(t_{\text{п}} - t_{\text{о.с}}) \cdot S_{\text{п}},$$

где  $R$  – термическое сопротивление приемника, зависящее от теплоизоляции приемника и от покрытия;  $\alpha_{\text{л}}$ ,  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициенты теплоотдачи от теплоприемника окружающей среде излучением и конвекцией.

Полезный тепловой поток, поступающий к теплоносителю, определяется через уравнение теплопередачи:

$$Q = k(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) \cdot S'_{\text{п}},$$

где  $k = (\delta/\lambda + 1/\alpha_{\text{п}})^{-1}$  – коэффициент теплопередачи от внешней поверхности поглощающей панели к энергоносителю,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha_{\text{п}}$  – толщина, коэффициент теплопроводности и коэффициент теплоотдачи поглощающей панели;  $t_{\text{в}}$  – средняя температура энергоносителя;  $S'_{\text{п}}$  – площадь внутренней поверхности поглощающей панели.

С другой стороны, полезный тепловой поток можно определить через тепло, поглощенное теплоносителем. При нагревании статической массы жидкости

$$Q = m \cdot c_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{dt},$$

при нагревании протекающей жидкости

$$Q = G \cdot c_{\text{в}}(t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}),$$

где  $G$  – расход протекающей жидкости;  $c_{\text{в}}$  – теплоемкость теплоносителя;  $t_{\text{в1}}$ ,  $t_{\text{в2}}$  – температура втекающей в приемник и вытекающей из него жидкости.

Максимальная температура теплоносителя, достигаемая в гелиоколлекторе, определяется из условия  $Q_{\text{погл}} = Q_{\text{пот}}$ . Тогда

$$\tau_{\text{пок}} \cdot \alpha_{\text{п}} \cdot S_{\text{п}} \cdot E = (t_{\text{max}} - t_{\text{о.с}}) / R \cdot S_{\text{п}}.$$

Откуда находим максимальную температуру теплоносителя

$$t_{\text{maxпок}} = \tau_{\text{п}} \cdot \alpha_{\text{п}} \cdot E \cdot R_{\text{о.с}} + t_{\text{о.с}}.$$

КПД гелиоколлектора определяется по формуле

$$\eta = Q / (S_{\text{п}} \cdot E) = \eta_0 - k_1 \frac{\Delta t}{E} - k_2 \frac{(\Delta t)^2}{E},$$

где  $\eta_{\text{поп}} \tau_{\text{пр}} \alpha$  – оптический КПД, учитывающий потери гелиоколлектором на отражение солнечного излучения и его поглощение прозрачным покрытием (0,78–0,85);  $k_1$  – коэффициент тепловых потерь конвекцией (1,2–4,2);  $k_2$  – коэффициент тепловых потерь излучением (0,0073–0,0130);  $\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{о.с}}$  – разность температур коллектора и окружающей среды.

В результате КПД гелиоколлектора в зависимости от условий эксплуатации изменяется от 70% до 30%.

Характеристики гелиоколлектора могут быть улучшены за счет:

- уменьшения конвективных потоков между поглощающей панелью и прозрачной теплоизоляцией, если поместить еще одну дополнительную теплоизоляцию (двойное остекление приводит к уменьшению тепловых потерь через прозрачную изоляцию, но одновременно уменьшает и плотность потока излучения, падающего на поглощающую панель);

- использования вакуумированных приемников, в которых заполненная жидкостью черная трубка помещается внутри наружной стеклянной трубки и в пространстве между ними создается вакуум (вакуумирование исключает конвективный перенос тепла через наружную поверхность);

- уменьшения радиационных потерь от пластины и достижения более высоких температур теплоносителя, если на поверхность нанести спектрально-селективное покрытие, активно поглощающее коротковолновое излучение солнца и снижающие собственное тепловое излучение в длинноволновой части спектра.

### 2.2.3. Селективные поверхности

Идеальная поверхность солнечного приемника должна по возможности поглощать всю энергию и иметь минимальные потери излучения. Однако, согласно закону Кирхгофа, коэффициент излучения любого тела численно равен его коэффициенту поглощения при той же длине волны. Например, простая черная поверхность имеет  $\alpha = \varepsilon \approx 0,9$  для всех длин волн. Следовательно, черная поверхность будет иметь значительные потери излучения энергии.

Максимум энергии солнечного излучения соответствует длине волны 0,5 мкм, а максимум энергии, излучаемой приемником, соответствует длине волны 10 мкм. Идеальная поверхность солнечного приемника должна иметь максимальный коэффициент поглощения  $\alpha = \max$  при  $\lambda \approx 0,5$  мкм и минимальный коэффициент излучения  $\varepsilon = \min$  при  $\lambda \approx 10$  мкм. Поверхность, имеющая такую характеристику, называется **идеальной селективной поверхностью** (рис. 2.7).

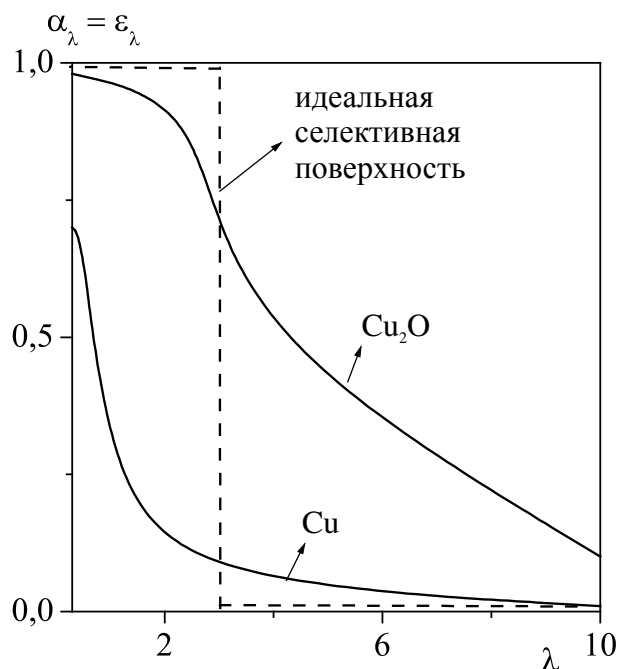


Рис. 2.7. Характеристики излучательной и поглощательной способности материалов

Некоторые полупроводники (кремний, оксид меди) хорошо поглощают коротковолновое излучение и практически не излучают длинноволновое, т. е. они близки по характеристикам к идеальной поверхности солнечного приемника (рис. 2.6). Однако полупроводники имеют ряд недостатков: низкая механическая прочность, низкая теплопроводность, высокая стоимость.

Металлы не имеют этих недостатков, однако они (например, медь) хорошо отражают, то есть слабо поглощают излучение при  $\lambda > 0,5$  мкм (рис. 2.7).

Если слой металла покрыть тонким слоем полупроводника, то их характеристики можно скомбинировать и получить качественную селективную поверхность.

Толщина слоя полупроводника определяется следующими взаимоисключающими факторами:

- 1) обеспечение эффективной теплопередачи, так как теплопроводность полупроводников низка (а также экономическими соображениями);
- 2) обеспечение максимальной поглощательной способности поверхности.

Как правило, толщину слоя полупроводника для промышленных селективных поверхностей принимают 1–3 мкм. При толщине 1 мкм слоем полупроводника поглощается около 63% коротковолнового излучения, а при толщине 3 мкм — около 95% коротковолнового

излучения. Промышленная селективная поверхность обычно имеет при температуре 20°C следующие параметры:  $\alpha \approx 0,85$  при  $\lambda \approx 1$  мкм и  $\varepsilon \approx 0,1$  при  $\lambda \approx 10$  мкм.

Однако при повышении температуры коэффициент поглощения значительно увеличивается и при температурах более 150°C отношение  $\alpha/\varepsilon$  достигает значений более 30.

Применение селективных покрытий может повысить КПД гелиоколлектора на 20%. Однако из-за свойств и дороговизны селективные поверхности нецелесообразно применять в плоских солнечных коллекторах при температурах ниже 60°C, но они могут найти широкое применение в концентраторах солнечной энергии, где температура может быть более 300°C.

#### 2.2.4. Конструкции поглощающих панелей

Поглощающая панель должна обладать следующими основными свойствами: коррозионной стойкостью по отношению к теплоносителю; хорошей теплопередачей, небольшой массой, технологичностью (с целью снижения затрат на изготовление).

Исходя из этого, поглощающие панели выполняют из металла (алюминия, стали) и полимеров.

Типичными конструкциями поглощающих панелей коллекторов из металла являются следующие:

- стандартная стальная панель (рис. 2.8, а);
- панель из гофрированного и плоского оцинкованных листов (рис. 2.8, б);
- прокатно-сварная алюминиевая панель (рис. 2.8, в).

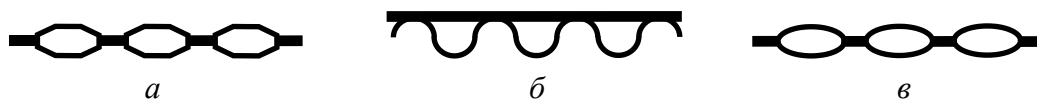


Рис. 2.8. Конструкции поглощающих панелей коллекторов из металла (поперечное сечение)

Панель, состоящую из двух оцинкованных листов – гофрированного и плоского, широко используют во всем мире.

Применяются следующие конструктивные схемы полимерных поглощающих панелей:

- из двух параллельных пластин, между которыми течет теплоноситель (рис. 2.9, а, в, д);
- из двух параллельных пластин, соединенных ребрами, образующими каналы для теплоносителя (рис. 2.9, б, з, е).

Принципиально возможны следующие схемы поглощения солнечного излучения:

- верхняя пластина является поглощающей (рис. 2.9, *а, б*);
- между двух параллельных пластин течет прозрачный теплоноситель, нижняя пластина – поглощающая (рис. 2.9, *в, г*);
- между двух прозрачных параллельных пластин протекает черный поглощающий теплоноситель (рис. 2.9, *д, е*).

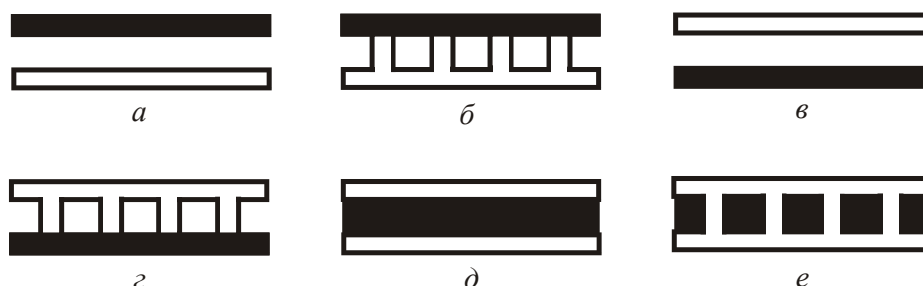


Рис. 2.9. Поперечное сечение конструкций полимерных поглощающих панелей

Наиболее распространенной является панель из черного материала, состоящая из двух параллельных пластин, соединенных ребрами. Предпочтение именно этой конструкции объясняется технологичностью ее изготовления и удобством монтажа.

Достоинство полимерных панелей – малый вес и низкая стоимость. Недостатки – недолговечность, низкая теплопроводность, что влияет на размеры поглощающей панели.

При использовании полимерных материалов для изготовления солнечного коллектора одной из основных проблем является работоспособность в течение длительного времени, так как их свойства ухудшаются. На полимерный материал оказывают вредное воздействие такие факторы окружающей среды, как температура, влажность воздуха, радиация, соли, кислород, агрессивные газообразные примеси, содержащиеся в воздухе ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , и др.), механические нагрузки от ветра, удары водных капель, града, а также песок и пыль. Повысить атмосферостойкость полимерных поглощающих панелей может прозрачное покрытие.

Для обеспечения высокой теплопередачи поглощающие панели должны иметь высокую теплоотдачу  $\alpha$  и теплопроводность  $\lambda$ :

$$k = (1/\alpha + \delta/\lambda),$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от панели к теплоносителю;  $\delta$  – толщина панели;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности панели.



Полимерные поглощающие панели выполняют из материалов, полностью смачиваемых теплоносителем. Это обеспечивает максимальный контакт поглощающей поверхности с рабочей и, следовательно, высокую теплоотдачу от панелей к нагреваемой жидкости.

При устройстве солнечного коллектора из полимерных материалов необходимо обратить внимание на коэффициенты теплопроводности полимеров (при рабочих температурах 19–90°C теплопроводность составляет 0,2–0,6 Вт/(м·К)). При наполнении полипропилена сажей и графитом (до 30% состава) его теплопроводность повышается и составляет в указанном интервале температур 1,9–2,1 Вт/(м·К), однако это на порядок ниже, чем у металлических поглощающих панелей, – 50–390 Вт/(м·К)

Низкая теплопроводность полимерных материалов отражается на размерах поглощающей панели. Установлено, что листотрубная конструкция из полимерных материалов работоспособна и эффективна при иных, чем у металлических панелей, межцентровом расстоянии и толщине ребра. Так, при диаметре трубы 10 мм, коэффициенте теплопроводности 0,5–2,0 Вт/(м·К) и толщине 1 мм оптимальная ширина листа находится в интервале 10–25 мм, тогда как для металлической поглощающей панели при тех же диаметре трубы и толщине листа, коэффициенте теплопроводности 50–390 Вт/(м·К) ширина листа составляет 60–90 мм.

Несмотря на свой малый вес и цену, пластмассовые панели из-за недолговечности и быстрого старения под действием солнечных лучей, а также из-за малой теплопроводности и небольшой механической прочности не находят широкого применения. Они используются в основном для нагрева воды в плавательных бассейнах или подогрева поливочной воды, где требуется небольшое (до 10°C) повышение температуры.

#### **2.2.5. Концентрирующие гелиоколлектора**

Многие возможные приложения требуют более высоких температур, чем те, которые можно получить даже с помощью лучших плоских нагревателей. Для решения этих задач используются концентрирующие коллекторы.

Концентрирующий гелиоколлектор включает в себя концентратор, который представляет собой оптическую систему, собирающую солнечное излучение с большой поверхности и направляющую его на приемник, поглощающий излучение.

Чаще всего концентратор представляет собой параболические вогнутые (параболоцилиндры) (рис 2.10, *а*) или параболические объемные (параболоид вращения) (рис. 2.10, *б*) зеркала, выполненные из полированного металла, в фокус которых помещают приемник излучения (солнечный котел). Экран над приемником уменьшает тепловые потери от него. В качестве концентраторов солнечной энергии могут также использоваться оптические линзы. В отличие от зеркал, концентрирующих отраженное излучение, линзы концентрируют проходящее через них излучение (рис. 2.10, *в*).

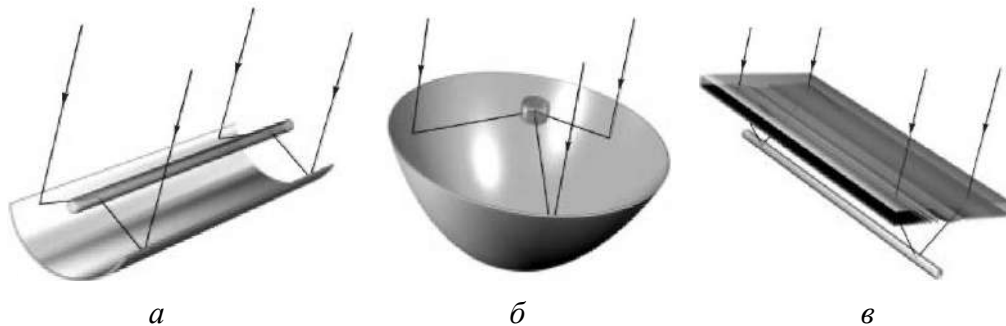


Рис. 2.10. Концентрирующие гелиоприемники

В отличие от плоских нагревателей, концентраторы в основном поглощают прямое солнечное излучение. Для обеспечения высокой эффективности процесса улавливания и преобразования солнечной радиации концентрирующий гелиоприемник должен быть постоянно направлен строго на Солнце. С этой целью гелиоприемник снабжают системой слежения, включающей датчик направления на Солнце, электронный блок преобразования сигналов, электродвигатель с редуктором для поворота конструкции гелиоприемника в двух плоскостях.

Для параболического концентратора энергия поглощения приемной трубкой равна

$$Q_{\text{погл}} = \rho \alpha S E,$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения концентратора;  $\alpha$  – коэффициент поглощения приемника;  $S = l \cdot D$  – площадь проекции концентратора;  $E$  – средняя плотность излучения (рис. 2.11).

При этом приемник излучает тепло, которое можно определить по формуле

$$Q_{\text{изл}} = \frac{\varepsilon \sigma T^4 D}{D' \sin \psi} r l,$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности трубки;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $T$  – температура приемника;  $r$  – радиус трубки;  $\psi$  – угол расхождения концентратора.

Радиус трубки выбирают, таким чтобы обеспечить минимальную площадь теплового излучения, достаточную площадь поглощения излучения:

$$r = D' \cdot \theta_s,$$

где  $\theta_s$  – угол схождения солнечных лучей.

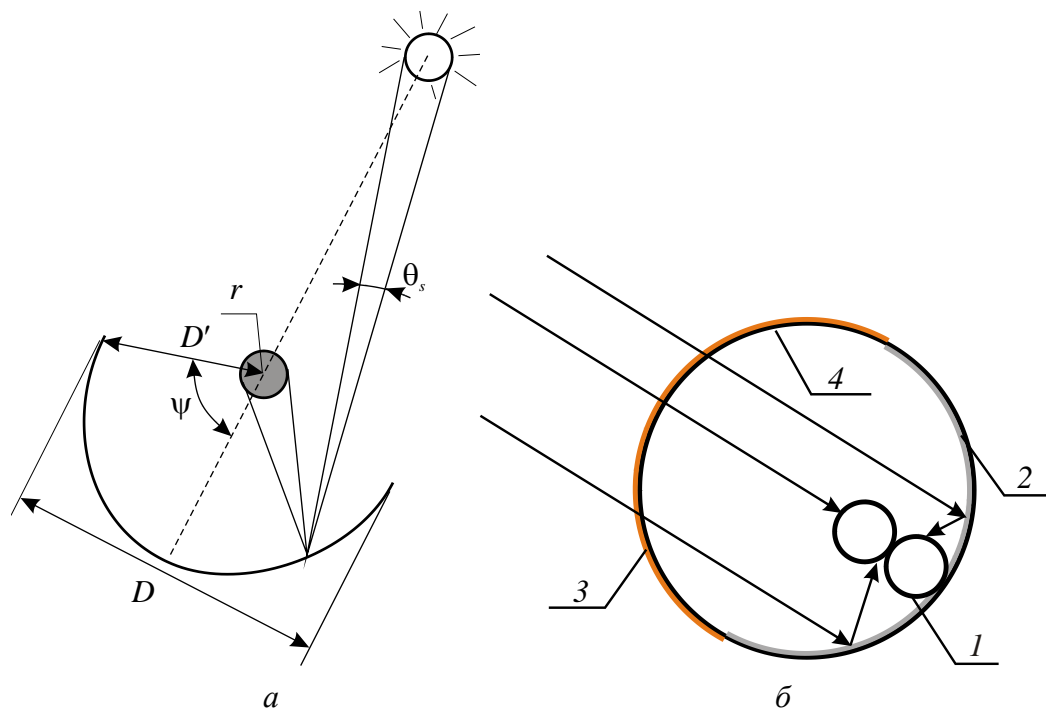


Рис. 2.11. Параболический концентратор (а) и концентратор с вакуумной трубкой (б):  
1 – теплоприемник; 2 – концентратор;  
3 – селективное покрытие; 4 – вакуумная трубка

Используя эти уравнения, получим выражение для определения максимальной температуры приемника при  $Q_{\text{погл}} = Q_{\text{изл}}$ :

$$T = \left( \frac{\alpha \rho E \sin \psi}{\varepsilon \sigma \theta_s} \right)^{1/4}.$$

При  $E = 600 \text{ Вт/м}^2$  температура приемника  $T = 1160 \text{ К}$ . Данная температура возможна при неподвижном теплоносителе в приемнике. В действительности температура теплоносителя в приемнике концентратора достигает около  $700 \text{ К}$ .

Для сферического концентратора (параболоида вращения)

$$T = \left( \frac{\alpha \rho E \sin^2 \psi}{4 \varepsilon \sigma_s} \right)^{1/4}.$$

При  $E = 600 \text{ Вт/м}^2$  температура приемника  $T = 3000 \text{ К}$ .

В концентрирующих коллекторах может быть целесообразно применение таких энергоэффективных методов, как вакуумирование и селективное покрытие. Например, эти методы использованы в концентраторе с вакуумной трубкой (рис. 2.11, б).

Альтернативным вариантом концентратора являются солнечные башни, в данном случае множество следящих за солнцем плоских зеркал отражают лучи на находящийся в центре приемник в виде башни. На солнечной башенной электростанции мощностью 5 МВт, расположенной в Крымской области, с помощью 1600 гелиостатов площадью  $25 \text{ м}^2$  получают теплоноситель давлением 4 МПа и температурой  $250^\circ\text{C}$ .

Преимуществом систем с концентрирующими гелиоколлекторами является способность получения теплоносителя с относительно высокой температурой (до  $100^\circ\text{C}$ ) и даже пара. К недостаткам следует отнести работу только в светлое время суток с прямым излучением, а следовательно, потребность в аккумуляторах большого объема; необходимость постоянной очистки отражающих поверхностей от пыли; высокую стоимость конструкции, обусловленную наличием привода системы слежения за ходом Солнца. Эти недостатки сдерживают широкое применение активных систем солнечного отопления с концентрирующими гелиоприемниками.

В настоящее время для Республики Беларусь эффективнее для солнечных систем отопления применять плоские гелиоколлектора.

#### **2.2.6. Теплоносители активных гелиосистем и способы их циркуляции**

Активные гелиосистемы по виду используемого теплоносителя делятся на *жидкостные* (вода, антифриз) и *воздушные*.

*Достоинства* воздушных гелиосистем:

- 1) воздух является незамерзающим во всем диапазоне рабочих параметров теплоносителем;
- 2) возможно совмещение воздушных систем отопления с системой вентиляции;
- 3) воздух (в отличие от воды) не вызывает коррозию трубопроводов и аппаратов;

4) утечка воды из системы может причинить больший ущерб, чем утечка воздуха.

*Недостатки:*

1) коллектор и аккумулятор воздушной системы требуют частой очистки от оседающей пыли, если не установлены фильтры;

2) воздух – малотеплоемкий теплоноситель (теплоемкость воздуха  $c_p = 1,0$  кДж/кг, воды  $c_p = 4,187$  кДж/кг), что ведет к увеличению его расхода;

3) воздух имеет низкий коэффициент теплоотдачи, что ведет к увеличению расхода металла на устройство систем воздушного отопления по сравнению с водяными системами.

Из-за последнего недостатка водяные солнечные системы нашли более широкое применение, чем воздушные.

Циркуляция теплоносителя может осуществляться естественно (естественной конвекцией) или принудительно (насосом).

При естественной циркуляции нагреватель должен находиться ниже накопителя нагретой воды (рис. 2.12), так как циркуляция осуществляется вследствие различия плотностей холодной (плотной) и горячей (менее плотной воды).

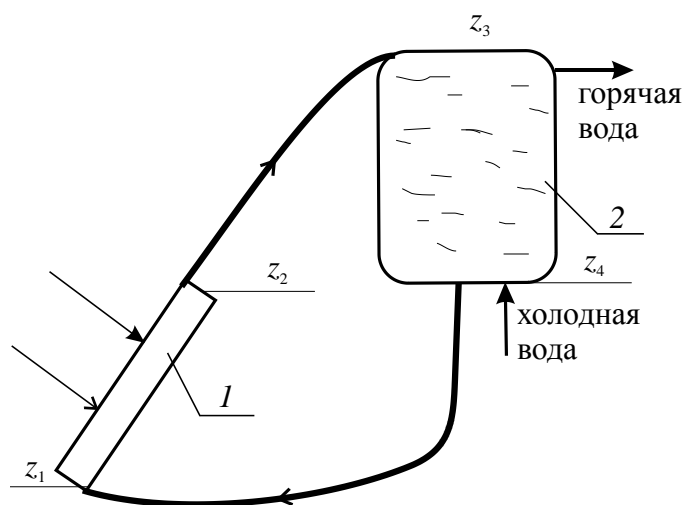


Рис. 2.12. Одноконтурная гелиосистема с естественной циркуляцией:  
1 – гелиоприемник; 2 – тепловой аккумулятор

Перепад давления между столбом горячей и охлажденной воды можно определить по формуле

$$\Delta p = g \int \Delta \rho dz,$$

где  $\Delta \rho$  – изменение плотности при изменении геометрической высоты  $dz$ .

Зависимость изменения плотности  $\Delta\rho$  от изменения температуры  $\Delta t$  имеет следующий вид:

$$\Delta\rho/\Delta t = -\beta \cdot \rho,$$

где  $\beta$  – коэффициент температурного расширения жидкости, который для воды при температурах от 0 до 100°C практически постоянен и равен  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$ .

Тогда перепад давления можно определить по формуле

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \beta \int \Delta t dz.$$

При условии, что температура в трубопроводах постоянна и равна соответственно  $t_T$  и  $t_B$ , имеем

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \beta (z_3 - z_1 + z_4 - z_2) (t_T - t_B) / 2,$$

где  $z_3, z_4$  – верхняя и нижняя геодезические точки резервуара, соответственно;  $z_2, z_1$  – верхняя и нижняя геодезические точки приемника соответственно.

Системы с принудительной циркуляцией выгодны, поскольку для их создания можно использовать существующие водонагревательные системы, вводя в них приемник солнечного излучения и насос. Кроме того, нет необходимости располагать в них накопительную емкость выше приемника. Недостатком является зависимость от электроэнергии, потребляемой насосом.

Мощность, потребляемую насосом при принудительной циркуляции, можно определить по формуле

$$N = G \cdot \Delta p / \rho,$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя;  $\Delta p$  – потеря давления в контуре на трение при прокачке теплоносителя;  $\rho$  – средняя плотность теплоносителя.

Для того чтобы теплоноситель в гелиоколлекторе успевал нагреваться до необходимой температуры (примерно на 4°C), скорость прокачки обеспечивают небольшую (режим ламинарный). Тогда потеря давления в системе определяется по формуле Пуазеля:

$$\Delta p = \frac{128 G \nu l}{d^4 \pi},$$

где  $l$  и  $d$  – соответственно длина и диаметр канала;  $\nu$  – кинематическая вязкость.

### 2.2.7. Виды активных гелиосистем

Основными элементами активной солнечной системы являются: гелиоколлектор, аккумулятор теплоты, дополнительный источник, или трансформатор теплоты (тепловой насос), потребитель (системы отопления и горячего водоснабжения зданий).

Активные гелиосистемы по техническому решению схем делятся на **одно-, двух- и многоконтурные**, а по продолжительности работы – на **круглогодичные и сезонные**.

Сезонные гелиосистемы горячего водоснабжения обычно одноконтурные и функционируют в летние и переходные месяцы (например, в летних детских лагерях). Они могут иметь дополнительный источник теплоты или обходиться без него в зависимости от назначения обслуживаемого объекта и условий эксплуатации.

Гелиосистемы круглогодичного действия многоконтурные, причем для разных контуров могут быть применены различные теплоносители (например, в гелиоконтуре – водные растворы незамерзающих жидкостей, в промежуточных контурах – вода, а в контуре потребителя – воздух). Они включают дополнительный источник теплоты в виде теплогенератора или трансформатора теплоты.

Простейшая гелиоустановка (рис. 2.13, а), действующая в теплое время года (апрель – октябрь), включает в себя несколько коллекторов 1, из которых набирается гелиополе необходимой площади. Коллекторы лицевой стороной направлены на юг и устанавливаются под углом, оптимальным для данной географической широты. Теплообменник помещается в герметичный «ящик» с термоизоляцией в донной части и с прозрачным покрытием на лицевой стороне.

Для повышения эффективности гелиосистемы необходимо задействовать максимальное число элементов теплообменников. Для этого коллекторы целесообразно соединить между собой и с системой трубопроводов диагональным способом. Условие самопроизвольного функционирования гелиоустановки за счет нагрева и естественной циркуляции воды – размещение бака-аккумулятора 2 выше коллекторов. После открытия вентиля 3 в транзитном трубопроводе вода самоотекотом заполняет теплообменники коллекторов. При воздействии прямых солнечных лучей и рассеянной в атмосфере тепловой энергии в воздушной «подушке» коллектора – под прозрачным покрытием – создается микроклимат, и вода быстро разогревается и, естественно, расширяется. Это вызывает термосифонный эффект (естественную циркуляцию) – поступление по трубопроводу теплой воды в бак и отбор из его нижней части новой порции – менее нагретой – воды в коллектора.

В летнее время температура воды в баке достигает 60–80°C. Из бака горячую воду посредством трубопровода можно забирать для различных нужд или подавать в систему теплоснабжения. По мере расходования горячей воды бак автоматически пополняется «сырой водой».

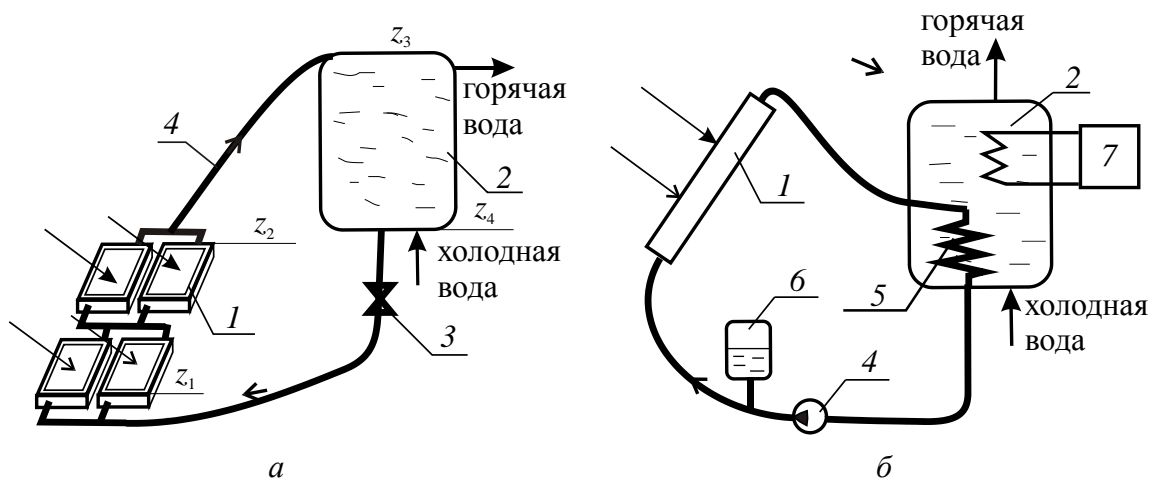


Рис. 2.13. Одноконтурная схема с естественной циркуляцией (а) и двухконтурная с принудительной циркуляцией (б)

теплоносителя солнечных водонагревательных установок:

1 – солнечный коллектор; 2 – аккумулятор тепла; 3 – вентиль; 4 – насос;  
5 – теплообменник; 6 – расширительный бачок; 7 – резервный источник тепла

В последние годы получают некоторое распространение всесезонные (круглогодичного действия) двухконтурные гелиоустановки. В таких установках расположенные вне помещения коллекторы 1 (рис. 2.13, б) принадлежат первому контуру, в котором в качестве теплоносителя применяют незамерзающую жидкость, например антифриз. Второй контур, бак-аккумулятор 2 (емкостью 500 и более литров) и дополнительный нагреватель 7, находится в обогреваемом помещении, где теплоноситель, как правило, вода.

Двухконтурные гелиосистемы в ограниченных количествах потребляют электроэнергию для задействования, в частности, электроприводного насоса 4, предназначенного для прокачки теплоносителя в первом контуре. При этом имеется возможность регулировать скорость прокачки теплоносителя; в наиболее холодное время года включают максимальную скорость прокачки. Из-за трения теплоносителя в трубопроводах и теплообменниках коллекторов, а также некоторого нагрева носителя в коллекторах от солнечных лучей (даже в зимнее время) температура носителя достигает 120°C. Это тепло посредством змеевика 5 нагревает воду в баке (расчетная температура 63°C).



По мере повышения температуры окружающей среды скорость прокачки носителя уменьшают. Изменение объема носителя вследствие его нагрева в первом (герметичном) контуре компенсирует расширительный бачок 6.

Бак-аккумулятор должен быть достаточно велик, чтобы обеспечить двухдневный запас горячей воды. Так как эффективность солнечного коллектора снижается с увеличением разности температур первичного контура и окружающей среды, температуру первичного контура следует поддерживать на возможно более низком уровне. Для этого следует обеспечить небольшой перепад температур в теплообменнике, воспрепятствовать перемешиванию в баке и обеспечить подвод тепла только в самую холодную нижнюю часть бака. Нагретая вода должна поступать в самую теплую верхнюю часть бака.

Опыт эксплуатации солнечных установок на основе солнечных коллекторов выявил ряд существенных недостатков подобных систем.

1. Высокая стоимость коллекторов. Увеличение эффективности их работы за счет селективных покрытий, повышение прозрачности остекления, вакуумирования оказываются экономически нерентабельными.

2. Необходимость частой очистки стекол от пыли, что практически исключает применение коллектора в промышленных районах.

3. При длительной эксплуатации, особенно в зимних условиях, наблюдается частый выход солнечных коллекторов из строя за счет нарушения целостности остекления из-за неравномерности расширения освещенных и затемненных участков. Отмечается также большой процент выхода из строя коллекторов при транспортировке и монтаже.

4. Неравномерность загрузки в течение года и суток.

Опыт эксплуатации коллекторов в условиях Европы при высокой доле диффузной радиации (до 50%) показал невозможность создания круглогодичной автономной системы горячего водоснабжения и отопления без больших по объему баков-аккумуляторов и включения в систему дополнительного источника энергии.

#### **2.2.8. Гелиосистема с абсорбером**

**Солнечные абсорберы** состоят из тепловоспринимающей панели с каналами, по которым циркулирует теплоноситель, и предназначены для нагрева теплоносителя до температуры окружающей среды. Теплоноситель подается в абсорбер с постоянной температурой на 3–5°C ниже температуры окружающего воздуха. Охлаждение теплоносителя производится с помощью теплового насоса (рис. 2.14).

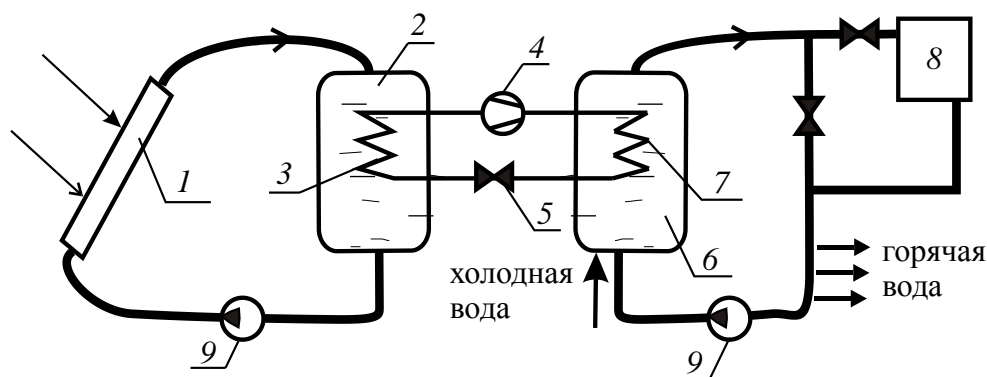


Рис 2.14. Двухконтурная комбинированная низкотемпературная система солнечного отопления с абсорбером, тепловым насосом и двумя жидкостными теплоаккумуляторами:  
 1 – солнечный абсорбер; 2 – низкотемпературный жидкостный теплоаккумулятор; 3 – испаритель теплового насоса; 4 – компрессор;  
 5 – дроссельный вентиль; 6 – высокотемпературный жидкостный теплоаккумулятор; 7 – конденсатор теплового насоса;  
 8 – дополнительный теплоисточник; 9 – циркуляционный насос

К устройству солнечных абсорберов предъявляются следующие требования: высокие поглотительные свойства поверхности за счет ее структуры, цвета, ориентации, высокие теплопроводность, долговечность (коррозионностойкость), низкая стоимость.

Преимущества солнечных абсорберов:

1. В солнечном абсорбере полезно используется не только прямое и рассеянное солнечное излучение, но и теплота атмосферного воздуха и осадков. Возможна также утилизация тепловых потерь через ограждающие конструкции при совмещении с ними абсорбера.

2. Солнечные абсорберы фактически не имеют потерь тепла. Лишь 5–10% падающей на их поверхность солнечной радиации отражается от нее в зависимости от цвета и качества покрытия. Абсорберы не требуют очистки от пыли, так как она увеличивает коэффициент поглощения солнечной радиации.

3. Собственное тепловое излучение абсорбера на небосвод и окружающие поверхности отсутствует. Следовательно, тепловоспринимающая панель не изолируется остеклением со стороны, обращенной к солнцу, а частично и теплоизоляцией с обратной стороны. В связи с этим отпадает необходимость в корпусе, что значительно снижает стоимость данной конструкции по сравнению с солнечными коллекторами.

4. Солнечные абсорберы устанавливаются на кровле или могут служить ее конструктивным элементом, а также применяются в виде облицовочных стен, балконных ограждений или элементов ограды.

При этом из-за их небольшого веса, в отличие от установки солнечных коллекторов, не требуется усиления несущих конструкций.

В качестве абсорбционных гелиоприемников чаще всего используются тепловоспринимающие панели двух типов: типа лист-труба и штампованные панели из алюминия и стали. Конструкция типа лист-труба обычно включает металлический лист, к которому привариваются трубы круглого сечения.

Недостатками этой конструкции являются небольшая площадь контакта труб с листом и разрушение их металла при сварке, что приводит к ускорению коррозии в местах сварки. Недостаток второго типа тепловоспринимающей панели – низкая долговечность, так как такая панель быстро корродирует с внутренней стороны.

Недостаток солнечных абсорберов – необходимость поддержания постоянно низкого температурного уровня теплоносителя (ниже температуры окружающей среды), из-за чего сложно их использование для отопления и горячего водоснабжения в зимний период.

### **2.2.9. Целесообразность применения гелиосистем в Республике Беларусь**

Учитывая то, что в ряде стран, близких по климатическим условиям к Беларуси, гелиосистемы стали традиционным инженерным оборудованием зданий, нельзя не обратить внимания на потенциал солнечной энергии нашей страны. А он достаточен в той степени, чтобы широко его использовать.

Солнечные коллекторы являются основными элементами гелиосистем. Примерные характеристики конкурентоспособных образцов: коэффициент эффективности отвода тепла – 0,93–0,99; средняя поверхностная плотность – 15–25 кг/м<sup>2</sup>; общий объем каналов для теплоносителя – 0,3–2,0 л/м<sup>2</sup>; срок службы – 20–25 лет. Отечественные коллекторы почти по всем параметрам значительно уступают зарубежным аналогам. Но работа в рассматриваемой области в нашей стране ведется.

В результате анализа имеющегося оборудования и технологий можно сделать следующие выводы о целесообразности применения гелиосистем в Беларуси.

1. В энергоэффективных зданиях можно применять гелиосистемы для предварительного подогрева водопроводной воды, поступающей в системы горячего водоснабжения и отопления. Однако отопление только за счет солнечной энергии на данный момент в Беларуси не эффективно. В дополнение к солнечной системе для целей отопления необходимо использовать либо тепловые насосы, либо котлы.

2. Наиболее широкое распространение должны получить системы горячего водоснабжения объектов сезонного функционирования: детско-юношеских лагерей, баз отдыха и туризма, санаториев, душевых установок для пляжей, а также дачные постройки. В данном случае следует применять одноконтурные водяные гелиоустановки с естественной циркуляцией теплоносителя без дополнительных источников тепла.

3. Большие перспективы имеет использование солнечной энергии в сельском хозяйстве (растениеводство в теплицах, сушка овощей, фруктов и других продуктов, теплоснабжение животноводческих помещений и т. д.).

Следует отметить, что стоимость тепловой энергии, получаемой посредством гелиосистем за рубежом, колеблется в диапазоне 0,005–0,040 долл. США за 1 кВт·ч. Предполагается, что к 2020 г. стоимость солнечных коллекторов в западных странах снизится до 50–100 долл. США за 1 м<sup>2</sup> (белорусские же коллектора уже теперь стоят столько), а тепловой энергии – до 0,004–0,020 долл. США за 1 кВт·ч.

#### **2.2.10. Другие тепловые способы применения солнечной энергии**

Солнечное излучение можно использовать для просушивания зерна, охлаждения воздуха и других целей, которые имеют большое значение для народного хозяйства.

**Сушка зерна.** Значительная часть урожая зерна в мире теряется вследствие поражения плесневым грибом, которое можно предупредить правильным просушиванием.

Влагосодержание (процентное содержание влаги в пробе зерна) определяется согласно формуле

$$d = (m - m_0) / m_0,$$

где  $m$  – полная масса пробы зерна,  $m_0$  – масса сухого вещества пробы зерна.

Процесс просушивания проходит неравномерно. Большая часть влаги содержится в сельскохозяйственных продуктах в виде жидкости, попавшей в поры, которая быстро теряется после уборки урожая. Оставшаяся часть воды, обычно 30–40%, связана с продуктом химически, и поэтому удалить ее труднее. Важно, что зерно необходимо просушить быстро (в течение нескольких дней), при этом температура сушки ограничена. Поэтому сушить зерно лучше всего нагретым солнечным излучением воздухом.

Во время просушивания зерно будет отдавать влагу окружающему воздуху до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие содержания

влаги, значение которого для данного продукта зависит от температуры и влажности окружающего воздуха. В процессе испарения влаги воздух будет охлаждаться. При этом будет соблюдаться баланс между подводимым теплом и теплом парообразования:

$$(m - m_0)r = Gc(t_1 - t_2)\tau,$$

где  $(m - m_0)$  – масса влаги в зерне;  $r$  – удельная теплота парообразования воды;  $c$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении и средней температуре;  $G$  – массовый расход воздуха;  $\Delta t$  – изменение температуры воздуха;  $\tau$  – время сушки.

**Охлаждение воздуха.** На охлаждение молока на молочных фермах расходуется значительная часть энергетических ресурсов. Этот процесс можно осуществлять с использованием энергии солнечного излучения в сорбционных холодильных машинах.

Сорбция – это процесс поглощения одного вещества другим с выделением тепла. Процесс сорбции при одинаковой температуре проходит при более низком, а обратный процесс (десорбция) при более высоком давлении.

Сорбционные трансформаторы тепла можно разделить на два типа: абсорбционные и адсорбционные. В абсорбционных трансформаторах используются жидкие сорбенты, поглощающие газообразные вещества всей массой, а в адсорбционных – твердые, поглощающие вещества поверхностным слоем.

Наиболее распространены абсорбционные трансформаторы тепла, упрощенная схема которых дана на рис. 2.15. Если сравнить этот трансформатор с компрессионным, можно увидеть, что вместо компрессора он содержит такие элементы, как абсорбер, насос, генератор и дополнительный дроссель, которые «выполняют» функции компрессора.

В абсорбционных трансформаторах в качестве рабочего вещества используются двухкомпонентные (бинарные) смеси с различной температурой кипения. Рабочий агент имеет более низкую температуру кипения, а поглотитель (абсорбент) более высокую. Температура кипения смеси в зависимости от концентрации раствора изменяется от минимальной до максимальной. Наиболее распространенными являются водоаммиачные и бромисто-литиевые смеси.

Рассмотрим принцип работы водоаммиачного абсорбционного трансформатора тепла (рис. 2.15). Теплота от внешнего источника  $Q_0$  передается рабочему веществу (аммиаку) в испарителе 1, там оно испаряется и затем поступает в абсорбер 5, где при низком давлении аб-

сорбируется поглотителем (водой). Происходит насыщение раствора с выделением теплоты  $Q_a$ . Затем раствор с помощью насоса 2 перекачивается в генератор 6, к которому подводится теплота солнечного излучения  $Q_r$ . В генераторе при высоком давлении происходит десорбция с поглощением теплоты  $Q_r$ . Затем обедненный поглотитель через дроссель возвращается в абсорбер, а рабочий агент поступает в конденсатор 3. При конденсации рабочего агента выделяется теплота  $Q_1$ , которая отводится потребителю. Конденсат направляется в испаритель, и рабочий цикл завершается.

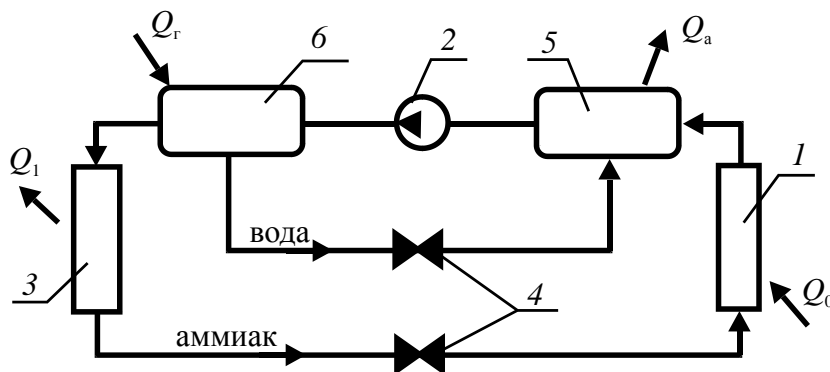


Рис. 2.15. Схема абсорбционного трансформатора тепла:  
1 – испаритель; 2 – насос; 3 – конденсатор;  
4 – дроссели; 5 – абсорбер; 6 – генератор

Общее количество полезной теплоты, получаемой с помощью сорбционного трансформатора тепла, равно  $Q_1 + Q_a$ . Эффективность холодильной машины определяется отношением  $Q_0 / Q_r$ . В абсорбционных трансформаторах тепла затраты энергии на перемещение насосом рабочего агента в жидкой фазе малы. Основные затраты энергии связаны с нагревом генератора. Это тепло может быть получено от солнечных нагревательных систем.

### 2.3. Фотоэлектрическая генерация

Фотоэлектрическая генерация – это процесс прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию. Данный процесс становится возможным при использовании фотоэффекта – явления, происходящего в веществах при их освещении (т. е. воздействием электромагнитным излучением).

Фотоэффект делится на два вида:

- фотоэлектрическая эмиссия (внешний фотоэффект) – выход электронов из металлов;

– вентильный фотоэффект (внутренний фотоэффект) – перемещение зарядов через границу раздела проводников с различными типами проводимости.

Фотоэлектрическая генерация основана на существовании вентильного фотоэффекта, который возникает при использовании полупроводников.

### 2.3.1. Электропроводимость полупроводников

Кроме проводников и диэлектриков, имеется группа веществ, проводимость которых занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Эти вещества не настолько хорошо проводят электричество, чтобы их назвать проводниками, и не настолько плохо, чтобы их отнести к диэлектрикам. Поэтому они получили название полупроводников.

Полупроводники – это проводники тока, в которых концентрация носителей заряда зависит от их температуры. При низких температурах полупроводники имеют весьма большое удельное сопротивление и практически являются изоляторами, но при увеличении температуры их удельное сопротивление уменьшается (в отличие от металлов). К ним относятся такие элементы, как кремний, германий, селен, оксид меди  $C_2O$ , сернистый свинец  $PbS$  и др.

Например, у кремния  $r = 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $n = 10^{17} \text{ электрон/м}^3$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $r = 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $n = 10^{24} \text{ электрон/м}^3$  при  $t = 700^\circ\text{C}$ .

Сильная зависимость концентрации носителей заряда в полупроводниках от температуры показывает, что в этом случае электроны проводимости возникают под действием теплового движения. Электроны проводимости – это электроны не взаимосвязанные с атомом, они возникают при сообщении им энергии, называемой **энергией ионизации**.

Чем выше температура полупроводника, тем больше электронов будет иметь энергию, большую энергии ионизации, тем большая часть электронов будет существовать в полупроводнике в несвязанном с атомом состоянии.

Плотность носителей заряда приблизительно определяется по формуле

$$n \approx \exp\left(-\frac{W}{kT}\right),$$

где  $W$  – энергия ионизации;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура полупроводника.

Рассмотрим образование электронов проводимости в полупроводниках на примере кремния. Атом кремния имеет порядковый номер  $z = 14$ . Следовательно, в состав атома входит 14 электронов. При этом десять электронов крепко связаны с ядром и образуют остов атома, имеющий заряд  $+14e - 10e = +4e$ .

Во внешней оболочке атома имеются четыре электрона, сравнительно слабо связанные с ядром, называемые валентными и образующие облако отрицательного заряда  $-4e$ . Именно эти слабосвязанные электроны вступают в химические реакции, поэтому кремний является четырехвалентным элементом.

В решетке кремния расположение атомов таково, что каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями. Связь двух атомов обусловлена парой валентных электронов, образующих парно-электронную связь. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы кремния друг возле друга. Плоская схема структуры кристалла кремния изображена на рис. 2.16, *а*. Эта картина соответствует чистому кремнию при низкой температуре.

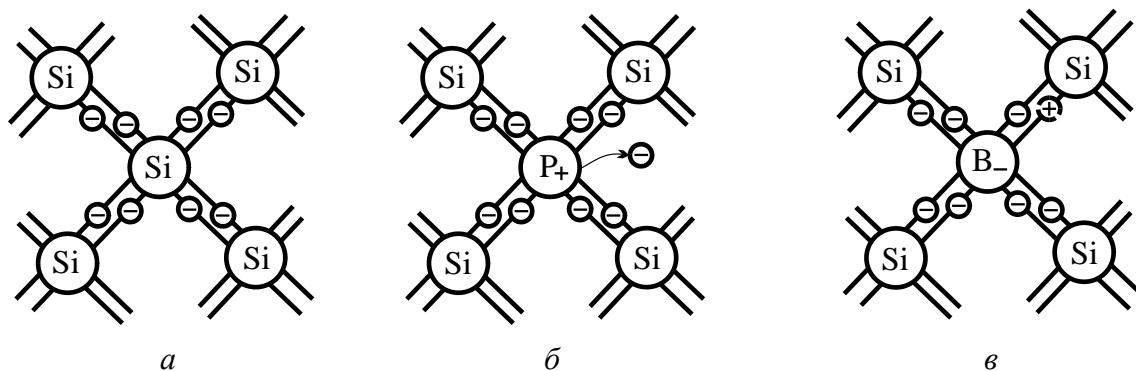


Рис. 2.16. Модель решетки кремния:  
*а* – без примеси; *б* – с примесью фтора; *в* – с примесью брома

Парноэлектронные связи кремния достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому кремний при низкой температуре не проводит электрический ток. Участвующие в связи атомов валентные электроны прочно привязаны к электрической решетке, и поэтому внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение.

При нагревании кремния кинетическая энергия валентных электронов повышается и наступает разрыв отдельных связей. Некоторые электроны становятся свободными, подобно электронам в металле. В электрическом поле они перемещаются между узлами решетки, образуя электрический ток.



Проводимость полупроводников, обусловленную наличием у них свободных электронов, называют электронной. При повышении температуры число разорванных связей, а значит, и свободных электронов увеличивается.

Кроме того, при разрыве связи образуется вакантное место с недостающим электроном. Такое место называют дыркой. В дырке имеются избыточный положительный заряд по сравнению с остальными, нормальными связями. Положение дырки в кристалле не является неизменным. Непрерывно происходит следующий процесс. Один из электронов, обеспечивающих связь атомов, перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает здесь парно-электронную связь, а там, откуда перескочил этот электрон, образуется новая дырка. Таким образом, дырка может перемещаться по всему кристаллу. При этом дырки имеют положительный заряд и ведут себя как положительно заряженные частицы. Такая проводимость называется дырочной.

Итак, проводимость чистых полупроводников (собственная проводимость) осуществляется перемещением свободных электронов (электронная проводимость) и перемещением связанных электронов на вакантные места парноэлектронных связей (дырочная проводимость).

Наряду с переходами электронов из связанного состояния в свободное существуют обратные переходы, при которых свободные электроны заполняют дырку. Это процесс называется рекомбинацией. В состоянии равновесия число прямых и обратных переходов одинаково.

### **2.3.2. Примесная проводимость**

Данный вид проводимости возникает в том случае, если некоторые атомы данного полупроводника заменены в узлах кристаллической решетки атомами, валентность которых отличается на единицу от валентности основных атомов. На рис. 2.16, б условно изображена решетка кремния с примесью 5-валентных атомов фосфора.

Для образования парноэлектронных связей с соседями атому фосфора достаточно четырех электронов. Следовательно, пятый валентный электрон оказывается как бы лишним и легко отщепляется от атома за счет энергии теплового движения, образуя странствующий свободный электрон. В отличие от рассмотренного выше случая образование свободного электрона не сопровождается нарушением парно-электронных связей, т. е. образованием дырки. Хотя вокруг атома примеси возникает избыточный положительный заряд, но он связан с этим атомом и перемещаться по решетке не может.

Благодаря этому заряду атом примеси может захватить приближившийся к нему электрон, но связь захваченного электрона с атомом будет непрочной и легко нарушается вновь за счет тепловых колебаний решетки.

Таким образом, в полупроводнике с 5-валентной примесью имеется только один вид носителей тока – электроны. Соответственно говорят, что такой полупроводник обладает электронной проводимостью или является полупроводником *n*-типа (от слова *negativ* – отрицательный). Атомы примеси, поставляющие электроны проводимости, называются донорами.

При наличии примесей электропроводимость полупроводников сильно изменяется. Например, кремний с добавкой фосфора в количестве 0,001% при комнатной температуре имеет удельное сопротивление 0,006 Ом·м, чистый кремний –  $10^3$  Ом·м.

Примеси искажают поле решетки, что приводит к возникновению на энергетической схеме так называемых локальных уровней, расположенных в запрещенной зоне кристалла (рис. 2.17). Любой уровень валентной зоны или зоны проводимости может быть занят электроном, находящимся в любом месте кристалла.

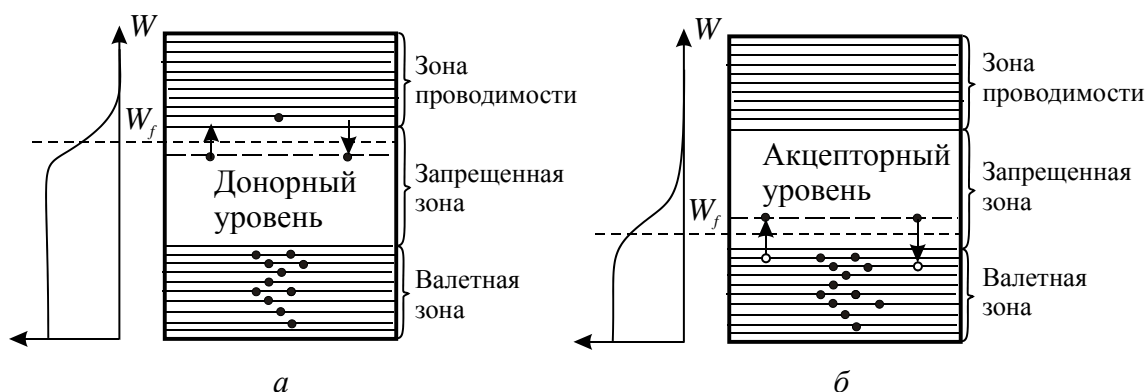


Рис. 2.17. Энергетические схемы полупроводников:  
*a* – *n*-типа; *б* – *p*-типа

Энергию, соответствующую локальному уровню, электрон может иметь, лишь находясь вблизи атома примеси, вызвавшего появление этого уровня. Следовательно, электрон, занимающий примесный уровень, локализован вблизи атома примеси.

Если донорные уровни расположены недалеко от потолка валентной зоны, они не могут существенно повлиять на электрические свойства кристалла. Иначе обстоит дело, когда расстояние таких уровней от дна зоны проводимости гораздо меньше, чем ширина запрещенной

зоны. В этом случае энергия теплового движения даже при обычных температурах оказывается достаточной для того, чтобы перевести электрон с донорного уровня в зону проводимости. На рис. 2.16, б этому процессу соответствует отщепление пятого валентного электрона от атома примеси. Захвату свободного электрона атомом примеси соответствует на рис. 2.17, а переход электрона из зоны проводимости на один из донорных уровней.

Уровень Ферми в полупроводнике  $n$ -типа лежит между донорными уровнями и дном зоны проводимости, при невысоких температурах – приблизительно посередине между ними (рис. 2.17, а).

На рис. 2.16, в условно изображена решетка кремния с примесью трехвалентных атомов бора. Трех электронов атома бора недостаточно для образования связей со всеми четырьмя соседями. Поэтому одна из связей окажется неупакованной и будет представлять собой место, способное захватить электрон. При переходе на это место электрона одной из соседних пар возникнет дырка, которая будет кочевать по кристаллу. Вблизи атома примеси возникнет избыточный отрицательный заряд, но он будет связан с данным атомом и не может стать носителем тока. Таким образом, в полупроводнике с трехвалентной примесью возникают носители тока только одного вида – дырки. Проводимость в этом случае называется дырочной, а о полупроводнике говорят, что он принадлежит к  $p$ -типу (от слова *positiv* – положительный). Примеси, вызывающие возникновение дырок, называются акцепторными.

На схеме уровней (рис. 2.17, б) акцептору соответствует расположенный в запрещенной зоне недалеко от ее дна локальный уровень. Образованию дырки отвечает переход электрона из валентной зоны на акцепторный уровень. Обратный переход соответствует разрыву одной из четырех парно-электронных связей атома примеси с его соседями и рекомбинации образовавшегося при этом электрона и дырки.

Уровень Ферми в полупроводнике  $p$ -типа лежит между потолком валентной зоны и акцепторными уровнями, при невысоких температурах – приблизительно посередине между ними (рис. 2.17, б).

С повышением температуры концентрация примесных носителей тока быстро достигает насыщения. Это означает, что практически освобождаются все донорные или заполняются электронами все акцепторные уровни.

Вместе с тем по мере роста температуры все в большей степени начинает сказываться собственная проводимость полупроводника, обусловленная переходом электронов непосредственно из валентной зоны в зону проводимости. Таким образом, при высоких температурах

проводимость полупроводника будет складываться из примесной и собственной проводимости. При низких температурах преобладает примесная, а при высоких – собственная проводимость.

### 2.3.3. $p$ – $n$ -переход

**$p$ – $n$ -переход** представляет собой тонкий слой на границе между двумя областями одного и того же кристалла, отличающимися типом примесной проводимости.

На рис. 2.18 показан ход концентрации примесей в направлении, перпендикулярном к граничному слою. В  $p$ -области основными носителями тока являются дырки, образовавшиеся в результате захвата электронов атомами примеси (акцепторы при этом становятся отрицательными ионами). Кроме того, в этой области имеется небольшое число неосновных носителей – электронов, возникающих вследствие перевода тепловым движением электронов из валентной зоны непосредственно в зону проводимости (этот процесс немного увеличивает и число дырок).

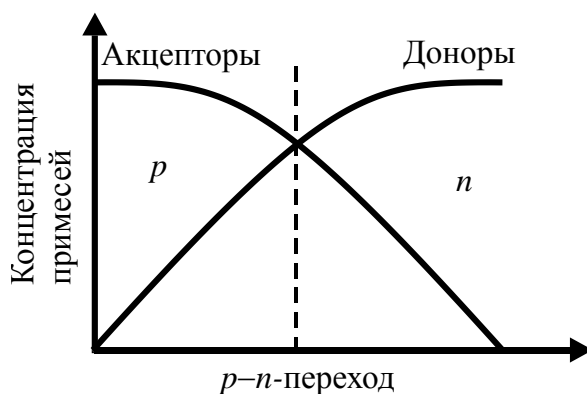


Рис. 2.18. Ход концентрации примесей в направлении, перпендикулярном к граничному слою

В  $n$ -области основные носители тока – электроны, а не основные – дырки. Диффундируя во встречных направлениях через пограничный слой, дырки и электроны рекомбинируют друг с другом. Поэтому  $p$ – $n$ -переход оказывается сильно обедненным носителями тока и приобретает большое сопротивление. Одновременно на границе между областями возникает двойной электрический слой, образованный отрицательными ионами акцепторной примеси, заряд которых теперь не компенсируется дырками, и положительными ионами – донорной примеси, заряд которых теперь не компенсируется электронами.

Электрическое поле в этом слое направлено так, что противодействует дальнейшему переходу через слой основных носителей. Равно-

весие достигается при такой высоте потенциального барьера, при которой уровни Ферми обеих областей располагаются на одинаковой высоте (рис. 2.19).

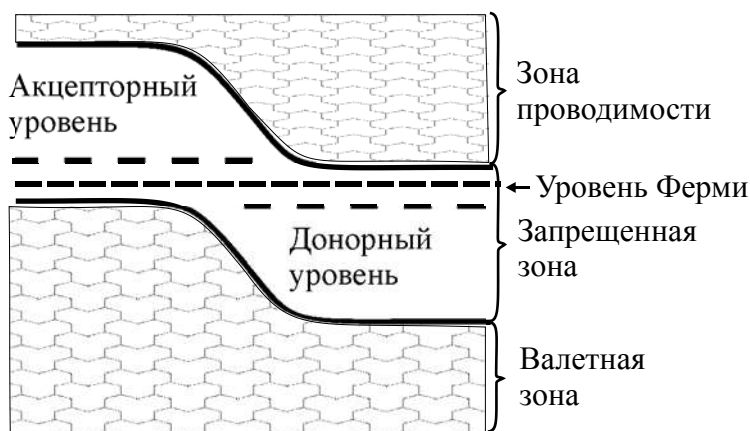


Рис. 2.19. Энергетическая схема  $p$ – $n$ -перехода

Изгибание энергетических зон в области перехода вызвано тем, что потенциал  $p$ -области в состоянии равновесия ниже, чем потенциал  $n$ -области; соответственно потенциальная энергия электрона в  $p$ -области больше, чем в  $n$ -области. Равновесие между  $p$ - и  $n$ -областями является подвижным. Некоторому количеству основных носителей удастся преодолеть потенциальный барьер, вследствие чего через переход течет небольшой ток  $I_{\text{осн}}$ .

Этот ток компенсируется обусловленным неосновными носителями встречным током  $I_{\text{неосн}}$ . Неосновных носителей очень мало, но они легко проникают через границу областей, «скатываясь» с потенциального барьера. Величина  $I_{\text{неосн}}$  определяется числом рождающихся каждую секунду неосновных носителей и от высоты потенциального барьера почти не зависит (для качественных солнечных элементов  $I_{\text{неосн}} \sim 10^{-8} \text{ А/м}^2$ ). Величина  $I_{\text{осн}}$ , напротив, сильно зависит от высоты барьера. Равновесие устанавливается как раз при такой высоте потенциального барьера, при которой оба тока  $I_{\text{осн}}$  и  $I_{\text{неосн}}$  компенсируют друг друга.

В присутствии света при поглощении фотонов с энергией больше энергии запрещенной зоны возможны переходы электронов из валетного состояния в несвязанное состояние:

$$h\nu \geq E_g,$$

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$  – постоянная Планка;  $\nu = c/\lambda$  – частота излучения,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света.

Поток генерируемых светом носителей образует фототок  $I_{\phi}$ . При этом на концах  $p$ – $n$  перехода возникает напряжение смещения  $U_n$ , которое вызывает «темновой ток», обусловленный наличием неосновных носителей

$$I_{т.т} = I_{неосн} \left[ \exp(eU_n / (kT)) - 1 \right],$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

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

Тогда ток нагрузки равен результирующему току через  $p$ – $n$  переход, а вольт-амперная характеристика освещенного солнечного элемента описывается следующим выражением:

$$I_n = I_{\phi} - I_{неосн} \left[ \exp(eU_n / (kT)) - 1 \right].$$

Вольт-амперная характеристика арсенид-галлиевого  $p$ – $n$ -перехода изображена на рис. 2.20, на этом же рисунке изображены вольт-амперные характеристики нагрузки для различных омических сопротивлений ( $R_{н1} < R_{н2}$ ):

$$I_n = U_n / R_n.$$

При известных параметрах нагрузочной вольт-амперной характеристики солнечного элемента и заданном значении сопротивления нагрузки  $R_n$  параметры  $I_n$  и  $U_n$  находятся методом последовательных приближений при совместном решении уравнений вольт-амперных характеристик солнечного элемента и потребителя либо графически, как это сделано на рис. 2.20.

Как показано на графике, при изменении нагрузки изменяются рабочие параметры ( $I_n$ ,  $U_n$ ) солнечного элемента. Если  $R_n$  мало, пересечение графиков происходит на горизонтальном участке вольт-

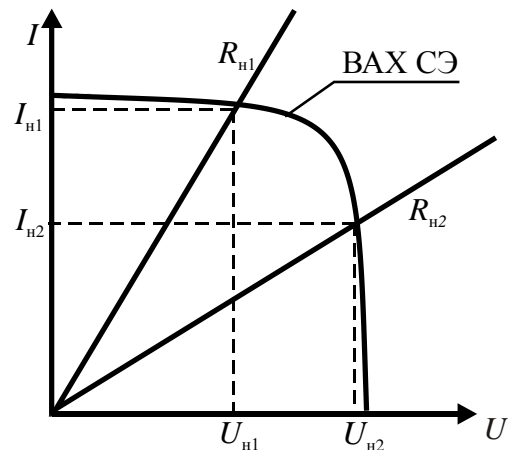


Рис. 2.20. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

амперной характеристики солнечного элемента, т. е. на участке, где «темновым» током через  $p$ – $n$ -переход можно пренебречь по сравнению с фототоком. По мере увеличения  $R_n$  ток через нагрузку уменьшается, так как с увеличением прямого смещения  $p$ – $n$ -переход как бы шунтирует нагрузку.

#### 2.3.4. Конструкция и недостатки солнечных элементов

Типичная структура солнечного элемента с  $p$ – $n$ -переходом на основе монокристаллического кремния изображена на рис. 2.21. Она включает: слой полупроводника (толщиной 0,2–1,0 мкм) с  $n$ -проводимостью 1, слой полупроводника (толщиной 250–400 мкм) с  $p$ -проводимостью 2, добавочный потенциальный барьер (толщиной 0,2 мкм) 3, металлический контакт 4, лицевой металлический контакт 5. Характерный размер солнечного элемента 10 см.

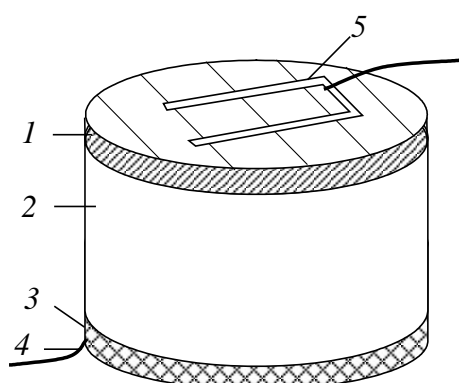


Рис. 2.21. Конструкция солнечного элемента

Напряжение холостого хода солнечных элементов составляет около 0,6 В, а плотность тока короткого замыкания достигает 4 мА/см<sup>2</sup>. Так как для большинства потребителей требуются более высокие значения напряжения и тока, то солнечные элементы последовательно соединяются в солнечные модули, которые, в свою очередь, параллельно соединяются в солнечные батареи, как изображено на рис. 2.22.

Недостатки солнечных элементов: высокая стоимость, низкий КПД, изменение рабочих параметров (напряжение и тока) солнечного элемента при изменении нагрузки, выработка постоянного тока.

Для большинства потребителей требуются более высокие значения напряжения и тока, то солнечные элементы последовательно соединяются в солнечные модули, которые, в свою очередь, параллельно соединяются в солнечные батареи, как изображено на рис. 2.22.

Недостатки солнечных элементов: высокая стоимость, низкий КПД, изменение рабочих параметров (напряжение и тока) солнечного элемента при изменении нагрузки, выработка постоянного тока.

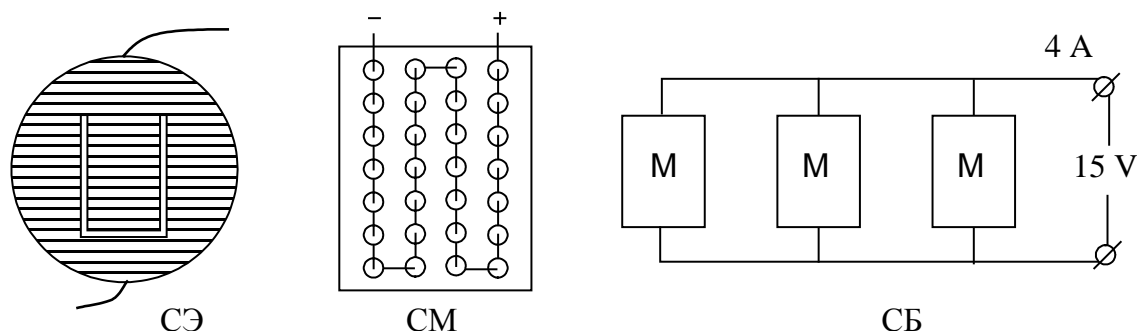


Рис 2.22. Солнечный элемент (СЭ), солнечный модуль (СМ) и солнечная батарея (СБ)

Поскольку энергии солнечного излучения, падающего на земную поверхность, во много раз больше, чем необходимо для жизнедеятельности человечества, то низкий КПД солнечных элементов не является сдерживающим фактором для развития фотогенерации. Основная причина малого применения солнечных элементов – это их высокая стоимость. Поэтому поиск более дешевых материалов (пускай даже с более низким КПД) – основное направление развития фотогенерации. Необходимо заметить, что также значительно повышает стоимость солнечной батареи (в 1,5–2 раза) дополнительное оборудование по поддержанию заданного рабочего напряжения солнечного элемента при любой нагрузке и по преобразованию вырабатываемого постоянного тока в переменный.

### 2.3.5. Ограничение эффективности работы солнечных элементов

Солнечные элементы характеризуются *коэффициентом преобразования* солнечной энергии в электрическую, который представляет собой отношение максимальной мощности вырабатываемой элементом электрической энергии к энергии потока излучения, падающей на элемент. Кремниевые солнечные элементы имеют коэффициент преобразования 10–15% (т. е. при освещенности  $1 \text{ кВт/м}^2$  вырабатывают электрическую мощность 1–1,5 Вт) при создаваемой разности потенциалов около 1 В.

Имеются следующие потери энергии при работе солнечных элементов.

1. Отсутствие поглощения фотонов с энергией, меньшей энергии запрещенной зоны  $h\nu < E_g$  (потери для фотоэлементов на основе кремния ~23%). Для кремния  $E_g = 1,1 \text{ эВ}$ , следовательно, солнечный элемент не воспринимает солнечные фотоны с длиной волны  $\lambda > 1,1 \text{ мкм}$ . Кроме того, эти фотоны приводят к нагреву солнечных элементов, что ухудшает качество их работы.

*Электронвольт* – работа, которую необходимо совершить, чтобы переместить электрон между двумя точками с разностью потенциалов 1 В ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

2. Избыток энергии фотонов переходит в тепло  $Q_{\text{нагр}} = h\nu - E_g$ , что также ухудшает работу солнечных элементов (потери для фотоэлементов на основе кремния ~33%).

3. Потери фототока происходят из-за наличия темнового тока, который увеличивается при увеличении ЭДС во внешней цепи (потери для фотоэлементов на основе кремния ~20%). Увеличение концентрации примесей приводит к снижению потерь, однако концентрация примесей ограничена технологически.



4. Возникновение потерь из-за наличия контакта на поверхности солнечного элемента. Если контакт маленький, возникают большие сопротивления, если большой – уменьшается площадь поверхности, воспринимающей солнечное излучение (потери ~3%).

5. Отражение солнечного излучения от принимающей солнечное излучение поверхности (потери ~1%).

В результате КПД солнечных элементов составляет 10–15%. При выполнении усовершенствований солнечных элементов предполагается поднять КПД солнечных элементов с  $p$ – $n$ -переходом в ближайшее время до 22–25%. Однако спектр солнечного излучения ограничивает КПД солнечного элемента не более 47%.

Увеличить КПД фотогенерации можно путем применения полупроводниковых преобразователей с гетеропереходами, многопереходных фотоэлементов, солнечных комбинированных фототермодинамических энергоустановок.

Особенно перспективными считаются **полупроводниковые преобразователи с гетеропереходами**. Они изготовлены из двух различных по химическому составу полупроводников (в отличие от описанного нами одного, но легированного с двух сторон разными примесями). Соответственно ширина запрещенных зон в каждом различна. В области  $p$ – $n$ -перехода возникает, за счет взаимного сглаживания потенциальных барьеров, дополнительная фото-ЭДС. Получены КПД около 20% на фотодиодах с гетеропереходом «арсенид алюминия – арсенид галлия». Примечательно, что при нагреве такие фотодиоды не ухудшают свои фотоэлектрические свойства.

**Многопереходные фотоэлементы.** Основные потери в большинстве современных солнечных элементов связаны с тем, что свободные носители заряда создаются только теми фотонами, энергия которых больше ширины запрещенной зоны или равна ей. Другими словами, фотоэлектрический отклик однопереходного элемента ограничен частью солнечного спектра, энергия которого выше ширины запрещенной зоны, а фотоны меньшей энергии не используются. Преодолеть это ограничение позволяют многослойные структуры из двух и более солнечных элементов с различной шириной запрещенной зоны. Такие элементы называются многопереходными, каскадными или тандемными. Поскольку они работают со значительно большей частью солнечного спектра, эффективность фотоэлектрического преобразования у них выше.

В типичном многопереходном солнечном элементе одиночные фотоэлементы расположены друг за другом таким образом, что солнечный свет сначала попадает на элемент с наибольшей шириной за-

прещенной зоны, при этом поглощаются фотоны с наибольшей энергией. Пропущенные верхним слоем фотоны проникают в следующий элемент с меньшей шириной запрещенной зоны и т. д.

**Солнечные комбинированные фототермодинамические энергоустановки.** Схема комбинированной солнечной энергоустановки соответствует ее основной идее – сочетание в одной установке фотоэлектрического и теплового методов преобразования энергии. Это сочетание основано на утилизации тепла, отводимого от фотоэлектрической батареи. Наиболее важным параметром, влияющим на КПД фотопреобразователей, является их рабочая температура. Ее значение также будет определяться расчетным путем физической и экономической оптимизации.

### **2.3.6. Материалы для изготовления фотоэлементов**

Солнечный элемент может изготавливаться из различных типов полупроводников. Необходимые требования, предъявляемые к материалам:

- повышенная способность к поглощению солнечного излучения;
- максимально приближенная к идеальной для солнечного излучения (1,5 эВ) для однопереходных солнечных элементов ширина запрещенной зоны;
- относительная нечувствительность к нагреву;
- высокая радиационная стойкость, что позволит использовать этот материал в космических аппаратах;
- низкая стоимость.

Наиболее распространенным полупроводником, используемым для создания солнечных элементов, является монокристаллический кремний. Однако в настоящее время достигнуты практически предельные показатели их энергетической эффективности при массовом промышленном производстве: КПД солнечных элементов 14–16% – при внеатмосферном освещении и температуре 28°C, плотность мощности солнечных батарей 150–175 Вт/м<sup>2</sup> и удельная мощность 50–70 Вт/кг.

Производство структур на основе монокристаллического кремния – процесс технологически сложный и дорогостоящий. Это обусловлено тем, что оптическое поглощение монокристаллического кремния невысокое, и поэтому для существенного поглощения солнечного излучения требуются дорогостоящие кремниевые подложки толщиной 250–400 мкм. Кроме того, для изготовления таких подложек на основе монокристаллического кремния необходимы трудоемкие операции резки, шлифовки и полировки. При резке выращенного при температуре более 1000°C монокристаллического цилиндра на пластины почти половина материала уходит в стружку.

Поэтому в последнее время было обращено внимание на материалы, обладающие высокими поглотительными свойствами: аморфный кремний, арсенид галлия, теллурид кадмия и поликристаллические полупроводники.

**Аморфный кремний** ( $a\text{-Si:H}$ ) выступил в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому. Первые солнечные элементы на его основе были созданы в 1975 году. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического. Это позволяет применять пленки толщиной 0,5–1,0 мкм, которые изготавливаются более дешевыми методами напыления. По сравнению с поликристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе аморфного кремния производят при более низких температурах (300°C): можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сократит расход кремния в 20 раз. Ширина запрещенной зоны 1,1 эВ. Максимальный КПД экспериментальных элементов на основе аморфного кремния – 12%, что несколько ниже КПД кристаллических кремниевых солнечных элементов (~15%). Однако не исключено, что с развитием технологии КПД элементов на основе аморфного кремния достигнет теоретического потолка – 16%.

**Арсенид галлия** ( $\text{GaAs}$ ) – один из наиболее перспективных материалов для создания высокоэффективных солнечных батарей. Это объясняется тем, что у него почти идеальная ширина запрещенной зоны 1,43 эВ, очень высокая способность к поглощению излучения, относительная нечувствительность к нагреву, высокая радиационная стойкость.

Основной недостаток арсенида галлия – высокая стоимость. Для удешевления производства предлагается формировать солнечный элемент на более дешевых подложках; выращивать слои арсенида галлия на удаляемых подложках или подложках многократного использования.

**Теллурид кадмия** ( $\text{CdTe}$ ) – еще один перспективный материал для фотогенерации. У него почти идеальная ширина запрещенной зоны (1,44 эВ) и очень высокая способность к поглощению излучения. Пленки теллурида кадмия достаточно дешевы в изготовлении. Кроме того, технологически несложно получать разнообразные сплавы  $\text{CdTe}$  с  $\text{Zn}$ ,  $\text{Hg}$  и другими элементами для создания слоев с заданными свойствами. Солнечные элементы на основе теллурида кадмия обладают высокими значениями КПД, от 10 до 16%.

**Поликристаллические тонкие пленки** также весьма перспективны для солнечной энергетики. Чрезвычайно высока способность к поглощению солнечного излучения у диселенида меди и индия ( $\text{CuInSe}_2$ ) – 99% света поглощается в первом микроне этого материала

(ширина запрещенной зоны – 1,0 эВ). Немного галлия в слое  $\text{CuInSe}_2$  увеличивает ширину запрещенной зоны, что приводит к повышению эффективности устройства.

Среди солнечных элементов особое место занимают батареи, использующие **органические материалы**. Органические материалы на основе углерода сравнительно дешевы и могут обладать полупроводниковыми свойствами (углерод находится в той же группе периодической системы, что и кремний, но сам полупроводником не является). Коэффициент полезного действия солнечных элементов на основе диоксида титана  $\text{TiO}_2$ , покрытого органическим слоем, весьма высок (~11%).

В 1958 году впервые солнечные батареи были использованы в США для энергообеспечения искусственного спутника Земли. В последующем они стали неотъемлемой частью космических аппаратов. Широко известны микрокалькуляторы, часы, радиоприемники и многие другие электронные аппараты, работающие на солнечных батареях.

Полная стоимость солнечных элементов с 1974 по 1984 год упала примерно со 100 до 4 долл. США на 1 Вт максимальной мощности. Предполагается снижение этой величины до 0,8 долл. США. Однако даже при полной стоимости солнечных элементов 4 долл. США на 1 Вт плюс вспомогательной аппаратуры 2 долл. США на 1 Вт при облученности местности  $20 \text{ МДж/м}^2$  в день и долговечности солнечных батарей 20 лет стоимость вырабатываемой ими электроэнергии составляет примерно 16 центов США за 1 кВт·ч (4,4 цента за МДж).

### **2.3.7. Применение солнечной энергии в космосе**

Солнечные энергоустановки в настоящее время являются самым популярным источником энергии для широкого спектра космических аппаратов, выполняющих научные, коммерческие и оборонные задачи. В целом суммарная мощность космических солнечных батарей в ближайшее десятилетие может достигнуть 10 МВт и более, а объем их промышленного производства должен будет находиться на уровне не менее 1 МВт/г.

В XXI столетии, по прогнозам специалистов многих стран, начнется создание солнечных космических электростанций, которые будут дистанционно передавать энергию как на космические аппараты, так и на Землю. Такие космические электростанции обладают рядом преимуществ:

- воспринимают неискаженное атмосферой солнечное излучение;
- легко меняют ориентацию, так как находятся в невесомости;
- воздействие солнечного излучения постоянно и не зависит от внешних факторов;

– накоплен опыт и технологии для их создания.

Основная проблема при использовании таких электростанций – это разработка способа передачи вырабатываемой энергии на Землю потребителю. Изучаются варианты передачи энергии в виде направленного лазерного или СВЧ-излучения.

## **2.4. Прямое использование солнечной энергии**

Прямое использование солнечной энергии для освещения помещений позволяет эффективно экономить электроэнергию. Республике Беларусь в целом использование естественного освещения даст снижение электропотребления на освещение свыше 7% и сельскому хозяйству до 5%. Это в среднем 225 млн. кВт·ч/год по республике, т. е. 10% от всей производимой электроэнергии с помощью тепловых электростанций.

Известен целый ряд устройств для непосредственной передачи в помещение солнечного света: окна с жалюзи, световой фонарь, специальное остекление, световой люк, коллектор с распределительным световодом. Применение последних двух устройств из этого списка наиболее перспективно и целесообразно в условиях сельскохозяйственного производства.

### **2.4.1. Световод**

Световод – это устройство, предназначенное для передачи электромагнитных волн оптического диапазона, состоящий из жгута оптических волокон. Конструкция отдельно взятого оптического волокна достаточно проста. Сердечник 1 из оптически более плотного материала окружен оболочкой 2 с меньшим коэффициентом преломления, и все это покрыто защитной оболочкой 3 (рис. 2.23, а). Оптическое волокно – типичный диэлектрический волновод электромагнитных волн.

Волоконно-оптические технологии в освещении применяются уже несколько десятилетий, но до сих пор считаются экзотикой. Между тем применение оптоволоконна позволяет легко и элегантно решать сотни технических проблем, возникающих при разработке световых проектов. Световоды хорошо себя зарекомендовали в качестве медицинских и технических эндоскопов, предназначенных для визуального наблюдения внутренних органов человека и животных, а также при осмотре деталей конструкций, находящихся в труднодоступных местах (например, двигатели самолетов и автомобилей). Стекловолоконно-оптическое волокно давно применяется в телекоммуникации для передачи данных с высокой скоростью.

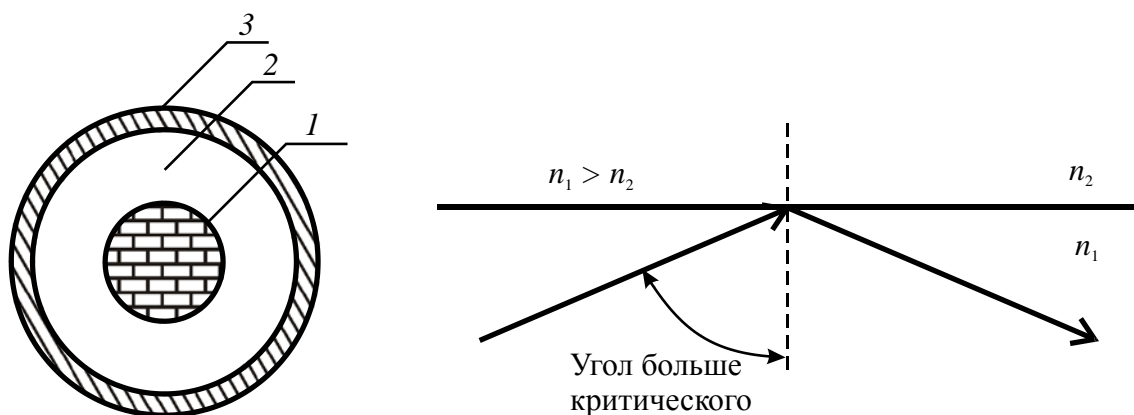


Рис. 2.23. Поперечное сечение световода (а), эффект полного отражения луча при угле падения больше критического (б)

Для того чтобы передать свет на некоторое расстояние, необходимо сохранить его мощность. Снизить потери света при передаче можно, во-первых, обеспечив достаточно оптически прозрачную среду распространения, тем самым сведя к минимуму поглощение волны, и, во-вторых, обеспечить движение луча только внутри волокна (без рассеивания). Первая задача в настоящее время решается с помощью применения высокотехнологичных материалов, таких как чистое кварцевое стекло. Вторая задача решается с помощью законов геометрической оптики.

Когда поток света пересекает границу раздела двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , то, как известно, наблюдаются два явления: преломление и отражение. Если световой поток пересекает границу раздела со стороны оптически более плотной среды, то угол преломления больше угла падения. С ростом угла падения преломленный луч будет прижиматься к границе раздела. И, наконец, при определенном угле падения, называемом критическим, преломленный луч начнет скользить вдоль поверхности раздела. При углах падения, больших критического, преломленный световой поток отсутствует (в идеализированном случае), поверхность раздела приобретает свойства зеркала – вся переносимая лучом энергия остается в отраженном потоке (рис. 2.23, б). Это явление носит название полного внутреннего отражения. На эффекте полного внутреннего отражения построены все оптические волокна. Условно оптическим волокном называют световоды, диаметр которых менее 0,5 мм.

Традиционные стеклянные волноводы требуют дорогих и дефицитных материалов, по меньшей мере, меди. Большие надежды возлагаются сейчас на полимерные волокна, которые примерно вдвое дешевле стеклянных. Пластик не подходит для создания высокоскорост-

стных линий передачи данных, но вполне пригоден для расстояний порядка нескольких десятков метров.

И сердцевина, и оболочка оптического волокна изготавливаются из стекла или пластика. Наиболее часто (вследствие лучших характеристик) используется оптоволокно типа «стекло-стекло», когда сердцевина и оболочка изготавливаются из особого кварцевого стекла. Понятно, что стекло, используемое для оболочки, должно иметь меньший показатель преломления, чем для сердцевины. Показатель преломления стекла регулируется с помощью легирующих добавок. В оптических волокнах показатели преломления сердцевины и оболочки различаются на величину порядка 1%. Затухание в световоде, т. е. потеря мощности светового сигнала, происходит в основном по двум причинам – поглощения и рассеивания.

Поглощение связано с возбуждением в материале световода электронных переходов и резонансов. В результате этого увеличивается тепловая энергия, накапливаемая в оптическом волокне. Поглощение зависит как от свойств материала, из которого изготавливается оптоволокно, так и от длины волны источника света.

Рассеивание меньше зависит от свойств материала и в основном определяется нарушением геометрической формы оптического волокна. Следствием этих нарушений является то, что часть лучей покидает оптоволокно. Интенсивность рассеивания зависит не только от качества материала, из которого изготавливается сердцевина волокна, но и от качества оболочки, так как часть сигнала, вопреки геометрической оптике, распространяется в ней (это явление связано с квантовой природой света). Бороться с этим можно за счет нанесения на оболочку поглощающего покрытия.

Волокна бывают различных диаметров, причем чем тоньше волокно, тем легче его сгибать, поэтому использование световода (оптоволоконного кабеля), объединяющего несколько волокон, является более практичным, чем применение одного волокна большего диаметра. Для механической защиты волокон в световоде употребляется пластиковая оболочка, сходная с изоляцией обычного кабеля (ПВХ, меголон и т. д.).

Диаметр волоконной жилы может быть весьма мал, так как явление прохождения света через стержень принципиально не меняется до тех пор, пока диаметр не станет сравнимым с длиной световой волны, – в таком случае законы геометрической оптики теряют силу и в значительной мере начинают проявляться волновые свойства света (дифракция). Проходя через оптоволокно диаметром 50 микрон, свет может претерпевать от 3000 до 20 000 отражений на метр, следовательно

но, для обеспечения высокого светопропускания необходимы гладкая поверхность и высокая прозрачность среды световода, а также прилегающей к нему среды.

Плотно расположенные в жгуте волокна соприкасаются друг с другом, и просачивание света наблюдается не только на самой линии контакта волокон, но и в области, где расстояние между ними меньше половины волны. Для предупреждения просачивания света необходимо изолировать волокна друг от друга тонкой оболочкой из прозрачного материала с меньшим показателем преломления, чем у волокон (именно с этой целью на жилу волокна наносится оболочка с близким значением показателя преломления). Такая оболочка должна обеспечить гладкость и чистоту поверхности светопроводящей сердцевины волокна, необходимые для исключения световых потерь при полном внутреннем отражении. Также для предотвращения просачивания на волокно можно нанести тонкий слой металла. В многожильных световодах удобно применять стеклянные волокна, изолированные друг от друга специально подобранной пластической изоляцией. Многожильные волокна обладают хорошими механическими свойствами (гибкость, прочность).

Светопропускание современных оптических волокон составляет не менее 90% на метр, а поглощение не более 0,1% на метр. Необходимо также отметить, что в жгутах хорошего качества свет, вошедший через боковые поверхности, может выйти только через поверхности, параллельные оси волокна, т. е. свет, вошедший не со стороны входного торца световода, не может покинуть световод через наблюдаемый (выходной) торец.

Материалы оптических кабелей не подвержены коррозии и экологически безопасны. Волоконно-оптические кабели не восприимчивы к помехам со стороны электромагнитных полей радиодиапазонов, и сами не создают таких помех. Они совершенно электробезопасны, поскольку переносимые в них мощности очень малы. Производители как полимерного, так и стеклянного оптоволокна декларируют средний срок службы изделий более 20 лет.

Жгуты для передачи света имеют следующие размеры: диаметр жгута 5–100 мм, диаметр единичного волокна 2–500 мкм, длина жгута 100–5000 мм.

Световоды бывают двух типов – торцевого и бокового свечения. Оптоволоконные кабели торцевого свечения работают по классической схеме передачи света с минимальными потерями в заданную точку пространства. Принцип действия кабелей бокового свечения, наоборот, основан на «побочном эффекте» свечения оптоволокна,



возникающем из-за потерь при внутреннем отражении, когда часть света проходит наружу (это происходит при изгибе волокна, когда угол падения лучей меньше предельного и фактически внутреннее отражение становится не полным, а частичным). В световодах бокового свечения используются такие же волокна, как и в кабелях торцевого свечения, только они особым образом скручены или переплетены. При этом применяется прозрачная гибкая оболочка, и свет становится хорошо видимым, создавая боковое свечение вдоль световода.

Щелевой световод представляет собой округлую или прямоугольную трубу в зависимости от используемого в нем зеркального покрытия. Зеркальные покрытия в круглых световодах, как правило, состоят из тонкого слоя алюминия и имеют, к сожалению, низкий коэффициент отражения (не более 0,7), однако они самые дешевые из всех производимых зеркальных покрытий. Также используют дорогостоящую призматическую пленку, имеющую коэффициент отражения до 0,95.

#### 2.4.2. Система оптоволоконного освещения

Система оптоволоконного освещения состоит из трех основных частей: *проектор, световодный жгут и оптические насадки* (рис. 2.24). Свет из проектора входит в один из концов оптоволоконного световода, доставляется в нужную точку пространства, распространяясь внутри волокна благодаря явлению полного внутреннего отражения, и свободно излучается другим концом световода. Проектор – довольно сложное устройство, в котором, помимо источника света со встроенным отражателем, могут находиться источник питания, пускорегулирующая аппаратура, экран, оптический порт, система охлаждения с вентилятором.

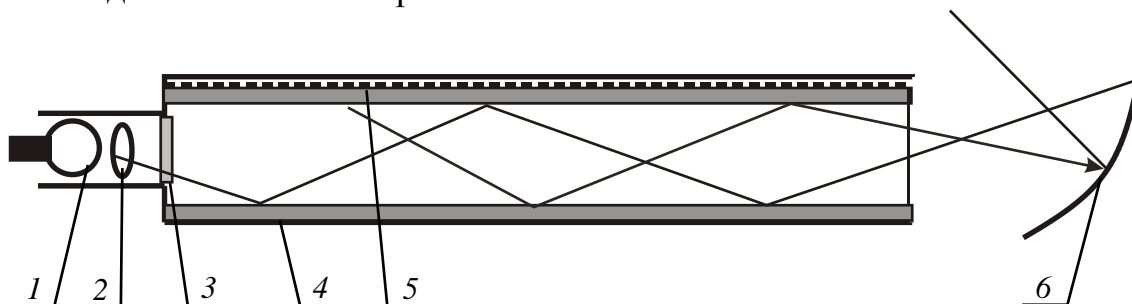


Рис. 2.42. Система опто-волоконного освещения:

1 – проектор; 2 – оптическое вводное устройство; 3 – светофильтр;  
4 – оболочка световода; 5 – экстрактор; 6 – цилиндрическое зеркало

*Проектор* – активный элемент оптоволоконной системы освещения – нуждается в особом обращении при установке и обслуживании,

а также очень важно его правильное размещение. По возможности он должен быть размещен вблизи концов световодов – это позволит существенно удешевить систему. Следует обеспечить доступ к проектору для чистки и замены лампы. Наконец, очень существенным аспектом является вентиляция. Для систем на базе полимерных волокон необходимо обеспечить температуру в области оптического порта не выше 30°C, поэтому в помещении, где предполагается устанавливать проектор, должно быть достаточно воздуха. В зависимости от применяемых источников света проектор может быть галогенным, газоразрядным или светодиодным.

*Световодный жгут* – уникальная часть системы, состоящая из группы волокон и световодов различных типоразмеров и длин. Световодный жгут, точнее тот его конец, который присоединяется к проектору, специальным образом обрабатывается и вставляется в соединительное устройство – оптический порт.

*Оптические насадки*, служащие для перераспределения в пространстве светового потока, выходящего из оптоволоконного световода, очень разнообразны и подобны миниатюрным светильникам разных типов. Насадки бывают неподвижными, поворотными, угловыми («кососветы»), с регулируемым по ширине световым пучком и чисто декоративные.

## 2.5. Биологический и химический способы использования солнечной энергии

Выбор для данного предприятия теплого, фотоэлектрического или прямого способа использования солнечного излучения определяется не их КПД, а прежде всего потребностью предприятия в тех или иных видах энергии (табл. 2.1). Это обусловлено тем, что производимую этими способами энергию нельзя надежно, без потерь и в больших объемах аккумулировать.

Таблица 2.1

### Эффективность применения способов использования солнечной энергии

Способ использования солнечной энергии	Утилизируемое излучение	КПД, %	Получаемая энергия
Тепловой (плоский гелиоколлектор)	Все	до 80	Горячая вода (40–60°C)
Фотоэлектрический	Коротковолновое	15–25	Электрический ток
Прямой (световод)	Коротковолновое прямое	95	Свет (видимое излучение)

С этой точки зрения биологический и химический способы более перспективны, так как производят химическую энергию, которую можно практически без потерь аккумулировать в больших объемах.

**Биологический способ** использования солнечной энергии основывается на способности растений путем фотосинтеза превращать солнечную энергию в химическую форму энергии, широко используемую человеком. В простейшем виде этот способ включает выращивание, сбор и сжигание растений, наиболее пригодных для этого. В настоящее время проводят исследования по использованию биотоплива на качественно новом уровне. Представляет интерес получение биотоплива, имеющего оптимальные характеристики: быстрорастущее и с высокой плотностью накопление горючих компонентов, экологически чистое, удобное для утилизации.

Проводятся экспериментальные исследования получения высококалорийного топлива путем использования солнечного света для выращивания быстрорастущих микроводорослей и других растений, накапливающих органическую биомассу. Использование морских водорослей для утилизации предполагается осуществлять на морских фермах и прудах очистки сточных вод.

**Химический способ** использования солнечной энергии заключается в использовании процессов разложения и синтеза веществ под действием солнечных лучей. Одним из наиболее перспективных методов считается разложение воды на водород и кислород под действием видимого света.

Как известно, лучи ультрафиолетового спектра разлагают воду на свои составляющие: водород и кислород. Однако эти составляющие солнечной радиации поглощаются в верхних частях атмосферы. Поэтому вода на поверхности Земли не разлагается на свои составляющие, а испаряется под действием солнечных лучей. Но в присутствии определенных катализаторов разложение воды под действием видимого солнечного света возможно. Уже найден ряд катализаторов для основных стадий разложения воды видимым светом.

Разложение воды на составляющие ее водород и кислород можно осуществить также с помощью фотоэлектрических элементов. Под действием света на фотоэлементе возникает напряжение, в результате чего происходит электролиз воды. Коэффициент полезного действия таких установок пока низок. По стоимости этот способ еще не может конкурировать с другими источниками энергии.

## 3. БИОЭНЕРГЕТИКА

### 3.1. Классификация, характеристика и способы сжигания биотоплива

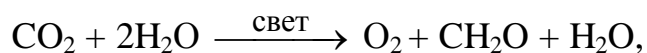
#### 3.1.1. Биотопливо и его источники

**Биотопливом** называют вещества растительного или животного происхождения, а также отходы, получаемые в результате их переработки.

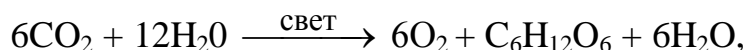
Основа биотоплива – органические соединения углерода, которые в процессе соединения с кислородом при сгорании или в результате естественного метаболизма выделяют тепло. Уникальная роль углерода в живой природе обусловлена тем, что химические связи между атомами углерода могут быть разорваны в сравнительно мягких физиологических условиях.

Первоначальная энергия биотоплива возникает в процессе фотосинтеза, являющегося естественным вариантом преобразования солнечной энергии. **Фотосинтез** – это процесс образования органических веществ (биомассы) и аккумулятирование химической энергии под действием солнечного излучения. При фотосинтезе происходят химические реакции, в которых в основном участвуют углерод, водород, кислород, минеральные вещества и солнечное излучение.

Одни из основных фотосинтезических реакций имеют вид



где  $\text{CH}_2\text{O}$  – основной компонент углеводов,



где  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  – глюкоза.

В результате фотосинтеза образуются химические соединения этих элементов, энергия которых больше, чем энергия исходных материалов на величину поглощенной солнечной энергии. При этом биомасса является основным исходным веществом (рис. 3.1) для образования ископаемых топлив (торфа, угля, нефти, газа).

Биомасса и образованные из нее ископаемые являются **аккумулятором солнечной энергии**. Биомасса – наиболее дешевая и крупномасштабная форма аккумулятирования энергии. Ежегодный прирост органического вещества на Земле составляет  $2 \cdot 10^{11}$  т, или примерно  $3 \cdot 10^{21}$  Дж. Это в десять раз больше необходимой энергии для человечества.

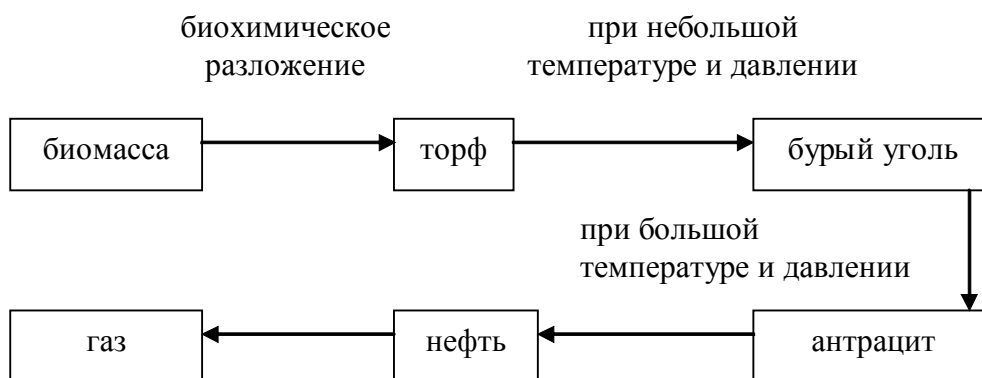


Рис. 3.1. Естественная трансформация биомассы в природе

При последующем взаимодействии полученных в результате фотосинтеза веществ с кислородом солнечная энергия высвобождается в виде тепла, а продукты реакции могут вновь преобразовываться в биотопливо.

Таким образом, в природе существует биологический круговорот (рис. 3.2). Следовательно, использование биотоплива позволяет обеспечить непрерывный процесс получения энергии без загрязнения окружающей среды.

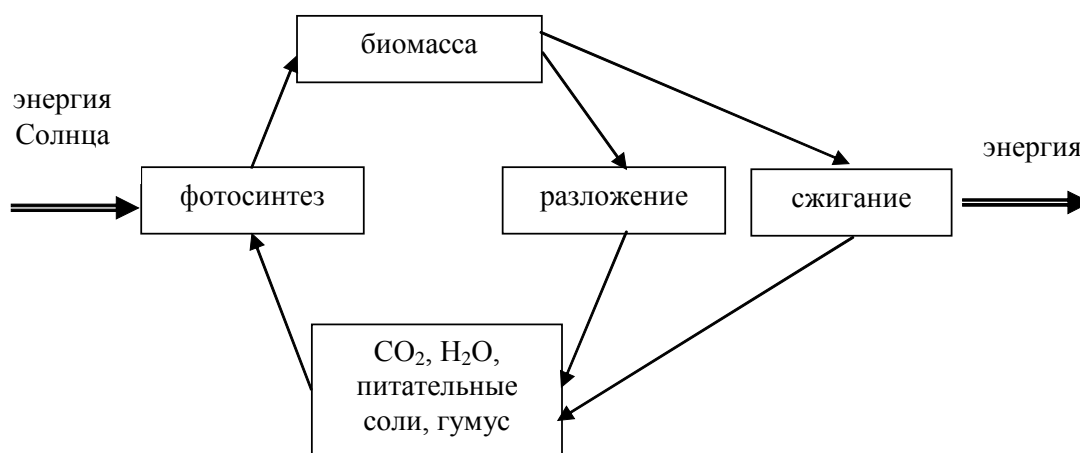


Рис. 3.2. Круговорот биомассы в природе

Источники биотоплива и нетрадиционные топлива, характерные для Республики Беларусь, могут быть сгруппированы следующим образом:

- 1) древесная биомасса (деревья, кустарник и продукты их переработки) – оцениваемый потенциал 3 млн. т у. т./год;
- 2) отходы от возделывания зерновых культур (солома, стебли, ботва, шелуха от зерен и др.) – 2 млн. т у. т./год;
- 3) отходы животноводства (навоз, помет) – 0,17 млн. т у. т./год;

4) отходы промышленности и бытовые отходы (мусор) – 0,47 млн. т у. т./год;

5) энергетическая биомасса (растения, выращиваемые с целью получения топлива) – 1–3 млн. т у. т./год;

6) торф – 0,5 млн. т у. т./год (запасы 2,2 млрд. т у. т.);

7) сланцы – запасы 792 млн. т у. т.

Следует отметить, что отходы от возделывания зерновых культур, животноводства, промышленные и бытовые отходы, по сути, являются вторичными энергетическими ресурсами и рассмотрение их характеристик и способов переработки не должно иметь место в рамках этого курса. С другой стороны, получение энергии из этих видов биотоплива является для нашей страны пока еще нетрадиционной энергетикой, а любая сельскохозяйственная культура при определенных условиях может стать энергетическим топливом.

Промышленно освоенная технология эффективной утилизации сланцев еще не разработана в нашей стране, а следовательно, этот способ получения энергии является нетрадиционным. Кроме того, запасы сланцев в нашей стране очень значительны, и поэтому рассмотрению способов их возможной утилизации будет отведено достаточно много места в данном курсе.

### 3.1.2. Характеристика топлива

Топливом называется вещество, которое при сгорании образует продукты, нагретые до высоких температур, за счет содержащейся в топливе химически связанной энергии. Состав топлива (содержанием в нем отдельных элементов) характеризуется следующим уравнением:

$$C^P + H^P + S^P + O^P + N^P + A^P + W^P = 100\%,$$

где  $C^P$ ,  $H^P$ ,  $S^P$ ,  $O^P$ ,  $N^P$ ,  $A^P$ ,  $W^P$  – содержание в топливе соответственно углерода, водорода, серы, кислорода, азота, золы и влаги.

В состав любого топлива в виде основных горючих элементов входят углерод  $C$ , водород  $H$  и сера  $S$ . Теплота сгорания водорода превышает теплоту сгорания углерода в 4 раза, но содержание водорода в топливе обычно невелико. Сера может сгорать и выделять теплоту, образуя сернистый и серный ангидрид. Кроме того, топливо содержит негорючие элементы (кислород  $O$ , азот  $N$ ), а также влагу  $W$  и золу  $A$ . Кислород обычно связывает некоторое количество горючих элементов, уменьшая этим выделение теплоты при сгорании топлива. Азот не участвует в процессе горения, но на его подогрев и выделение затрачивается определенное количество энергии.

Если топливо нагреть без воздуха до температуры около 850°C, то из топлива выделяются летучие вещества и остается твердый нелетучий осадок (кокс). Чем больше выход летучих и ниже температура начала их выделения, тем легче воспламеняется топливо и лучше горение.

Золу ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и др.), прошедшую стадии плавления компонентов (температура плавления 1000–1200°C), при которых она частично разлагается и превращается в спекшуюся массу, называют **шлаком**.

Влажность (относительная или рабочая влажность) топлива – это отношение массы влаги к массе влажного топлива:

$$\omega = \frac{m - m_0}{m},$$

где  $m$  – общая масса топлива;  $m_0$  – масса сухого топлива.

Величина влажности топлива может изменяться в диапазоне  $0 \leq \omega \leq 1$ , при котором значение  $\omega = 0$  отвечает абсолютно сухому топливу, а значение  $\omega = 1$  соответствует влаге в отсутствие топлива.

Влагосодержание (абсолютная влажность) топлива – это отношение массы влаги к массе сухого топлива:

$$d = \frac{m - m_0}{m_0}.$$

Величина влагосодержания топлива может изменяться в диапазоне  $0 \leq d \leq \infty$ , при котором значение  $d = 0$  отвечает абсолютно сухому топливу, а значение  $d = \infty$  соответствует влаге в отсутствие топлива. Поскольку величина  $m_0$  не изменяется в процессе сушки материала, то параметр влагосодержания удобнее использовать при технологических расчетах сушки топлива.

### 3.1.3. Способы переработки биотоплива

Переработка исходного топлива производится с целью получения другого, более эффективного топлива, удобного для автоматизированного сжигания с более высокими энергетическими показателями. Автоматизация тепловых установок позволяет увеличить экономическую эффективность при утилизации энергоресурсов. Экономическими конкурентами биотоплива являются в основном жидкое топливо и природный газ, поскольку они однородны и их легко адаптировать к автоматике – изменение расхода жидкости или газа в трубе осуществляется простыми методами. Для достижения однородности и возмож-

ности осуществления надежной регулировки расхода биотоплива должно перерабатываться.

Имеются следующие способы подготовки биотоплива к сжигания:

- 1) без переработки;
- 2) неглубокая переработка – сушка, дробление, прессование, экстракция;
- 3) глубокая (термохимической или биохимической) переработка – пиролиз, анаэробное брожение, ферментация.

Сушке может подвергаться любое биотопливо с целью повышения теплоты его сгорания. Однако следует учитывать, что сушка – это очень энергоемкий процесс, и поэтому для его применения необходимо экономическое обоснование. Дроблению и прессованию в основном подвергается древесное топливо и торф. Экстракции (выжимке) подвергаются масленичные растения. Пиролизу подвергают биотопливо с влажностью менее 50%, анаэробному брожению и ферментации, наоборот, – с влажностью более 50%. Источники биомассы и способы их переработки с примерным КПД представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Источники биомассы и способы их переработки перед сжиганием**

Источники биомассы	Способы переработки	КПД, %
Лесаразработки, отходы переработки древесины (древесная масса)	Без переработки	70
	Пиролиз	85
Отходы с.-х. культур (солома, ботва и др.)	Без переработки	70
	Анаэробное брожение	80
Отходы животноводства (навоз, помет)	Анаэробное брожение	50
Бытовые и производственные отходы (мусор)	Без переработки	50
	Анаэробное брожение	50

#### **3.1.4. Источники и характеристика древесного топлива**

Древесина в зависимости от ее вида имеет различный состав. Она состоит из клетчатки 50–70% (содержащей углерод, водород и кислород), межклеточного вещества 30–50% (лигнина), азота, смолистых веществ, древесного сока в виде раствора в воде органических и минеральных веществ. Элементарный состав горючей массы древесины различных пород примерно одинаков и содержит следующие массовые доли:  $C^r = 50,9\%$ ,  $H^r = 6,1\%$ ,  $O^r = 41,9\%$ ,  $N^r = 0,8\%$ ,  $S^r = 0,3\%$ .

**Влажность древесного топлива.** Различают две формы влаги, содержащейся в древесной биомассе: свободную и связанную.

Свободная влага находится в полостях клеток и в межклеточном пространстве древесины и удерживается только механическими



связями. По существу, такая влага ничем не отличается от разлитой жидкости на какой-нибудь поверхности.

Связанная влага находится внутри стенок клеток и удерживается кроме механических дополнительными физико-химическими (адсорбционными, капиллярными, гигроскопическими и др.) связями. Затраты при сушке связанной влаги превышают теплоту испарения.

В зависимости от величины влажности стволовую древесину подразделяют на мокрую, свежесрубленную, воздушно-сухую, комнатно-сухую и сухую.

*Мокрой* называют древесину, длительное время находившуюся в воде. Влажность мокрой древесины находится в диапазоне 50–80%.

*Свежесрубленной* называют древесину, сохранившую влагу растущего дерева. Она зависит от породы дерева и изменяется в пределах 33–60%. Влажность коры в свежесрубленном состоянии изменяется в широких пределах (от 27 до 68%). Влажность элементов кроны составляет около 50%.

*Воздушно-сухая* – это древесина, выдержанная длительное время на открытом воздухе. Получить сухую древесину сложно из-за наличия в ней связанной влаги. При сушке сначала удаляется свободная влага, затем связанная. При длительном нахождении древесины на открытом воздухе в сухую погоду (сушке) ее влажность уменьшается до 17–25%.

*Комнатно-сухая* – это древесина, длительное время находящаяся в отапливаемом и вентилируемом помещении (влажность 7–11%).

**Зольность древесного топлива.** Зола подразделяется на внутреннюю тугоплавкую (температура плавления выше 1450°C), содержащуюся в древесном веществе, и внешнюю легкоплавкую (температура плавления 1100–1350°C), попавшую в топливо при заготовке, хранении и транспортировке биомассы. Зола является нежелательной частью топлива, так как снижает содержание горючих элементов и затрудняет эксплуатацию топочных устройств.

Содержание внутренней золы стволовой древесины изменяется в пределах от 0,20 до 1,17%. Зольность коры больше зольности стволовой древесины из-за постоянного взаимодействия коры с атмосферным воздухом, содержащим минеральные аэрозоли. Зольность коры различных пород варьируется от 0,5 до 8%. Внутренняя зольность листьев около 3,5%, веток и сучьев – от 0,3 до 0,7%. Однако в зависимости от типа технологического процесса заготовки древесины зольность коры, элементов кроны (листьев, веток и сучьев) существенно увеличивается из-за загрязнения их внешними минеральными включениями.

**Теплота сгорания** древесины сильно зависит от влажности, и приближенно ее можно определить по формуле Д. И. Менделеева (кДж/кг):

$$Q_H^p = 340C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25,2W^p = \\ = 189(100 - A^p - 1,13W^p).$$

Высшая теплота сгорания ствольной древесины (теплота сгорания абсолютно сухого топлива) практически не зависит от вида древесины и примерно равна 18,9 МДж/кг.

Теплоту сгорания топлива  $Q_2$ , кДж/кг, при изменении его влажности (от  $W_1$  до  $W_2$ ) и зольности (от  $A_1$  до  $A_2$ ) можно найти по формуле

$$Q_2 = (Q_1 + 25W_1) \frac{100 - W_2 - A_2}{100 - W_1 - A_1} - 25W_2.$$

Теоретическое количество воздуха  $V_B^0$ , м<sup>3</sup>/кг, необходимого для сжигания 1 кг древесного топлива можно определить по формуле

$$V_B^{0p} = 0,0889C^p + 0,265H^p + 0,033(S - O) = \\ = 0,047(100 - A^p - 1,13W^p).$$

В Республике Беларусь в последнее время доля древесного сырья в топливно-энергетическом балансе составляет около 2%. Причем в стране имеются значительные запасы неиспользуемого древесного сырья. Древесные отходы в Республике Беларусь образуются по всей технологической цепочке работы лесопромышленного комплекса: лесовыращивание – лесозаготовки – лесопиление – деревообработка.

В Беларуси средний прирост древесины составляет 25 млн. м<sup>3</sup> в год. Утилизация прироста древесины составляет около 52% (табл. 3.2). При этом отходы деревообработки и лесопиления используются практически полностью. Неполное использование древесного потенциала объясняется отсутствием переработки отходов лесовыращивания и лесозаготовок.

Таблица 3.2

**Состав древесины по характеру ее использования, %**

	Полезная древесина	Дрова	Отходы
Сосна	51,4	34,8	13,7
Ель	57,7	27,5	14,8
Дуб	14,5	78,8	6,7
Береза	17,7	76,2	6,1
Осина	24,9	69,7	5,4

Ресурсы лесовыращивания представлены древесиной, заготавливаемой при рубках ухода за лесом, санитарных и прореживающих рубках. Как показывают данные, по югу Финляндии за время оборота рубки можно собрать отходов 155–300 м<sup>3</sup>/га. Таким же топливным потенциалом обладает Республика Беларусь. При этом выполнение в нужном объеме рубок ухода и санитарных рубок сдерживается отсутствием потребителей тонкомерной и некачественной древесины. Это привело к тому, что для Беларуси характерен дефицит спелых лесов. На 2000 год лес Республики Беларусь имел следующий состав: молодняки – 36,6%, средневозрастные – 44,3%, приспевающие – 14,2%, спелые – 4,9%.

Ресурс лесозаготовок представлен лесным топливом, т. е. тонкомером, ветками и верхушками деревьев, хвоей, пнями. Верхушка и ветки составляют 16–27% биомассы дерева, а корни и пень – 14–15%. Энергосодержание пней составляет 18–19 т у. т./га. Традиционно древесные отходы, получаемые при лесозаготовках, оставлялись в лесу в качестве органического удобрения. При этом перегнивание отходов затягивается на долгие годы (около 10 лет), происходит размножение вредителей и болезней, ухудшение почвы. На самом деле для сохранения органического баланса достаточно, если в почву попадает хвоя, листья, ветки и другие мелкие отходы деревьев. Если отходы рубки перед вывозом предварительно высушить и дать тем самым возможность осыпаться листьям и хвое, то потери минеральных веществ значительно сократятся. Дополнительная возможность компенсации потерь – это возврат золы, полученной при сжигании биотоплива, обратно в лес.

При использовании отходов лесовыращивания и лесозаготовок имеются значительные трудности:

- отходы рассредоточены на больших площадях, их сбор и обработка трудоемки, из-за низкого энергосодержания перевозка отходов на дальние расстояния не окупается;

- отсутствуют технологии с соответствующим набором машин и механизмов для сбора и транспортировки лесосечных отходов.

Дополнительным источником топливных ресурсов может быть древесина, вырубленная при раскорчевке или расчистке сельскохозяйственных земель (мелиорации) – 0,35 млн. м<sup>3</sup>, при торфодобыче и торфопереработке – 0,85 млн. м<sup>3</sup>.

Хорошим видом топлива являются отходы гидролизной переработки древесины – лигнин. В отвалах гидролизных заводов скопилось до 20 млн. т лигнина (4 млн. т у. т.).

Исходя из вышесказанного, приведем следующую классификацию древесного топлива.

**Лесное топливо** – кустарник, тонкомер, ветки и верхушки деревьев, хвоя, пни, т. е. все то, что считается некоммерческой древесиной, отходами от лесовыращивания и лесозаготовок.

**Простое топливо** – обрезки бревен и досок, опилки, стружки, древесная пыль (отходы лесопиления и деревообработки).

**Отработанное топливо** – это бывшие в употреблении пиломатериалы; сырье идет из строительной и упаковочной промышленности, от разборки деревянных конструкций и изделий. В Республике Беларусь это сырье вывозится на свалку или используется частными лицами для производства дров для собственных печей. Переработка этого сырья усложнена из-за наличия пропитки, краски и всяких включений (гвозди, бетон, стекло, пластик). Из-за включений его измельчение требует специальных дробилок, повышаются требования к горелочному оборудованию и отходам.

Таким образом, использование простого и отработанного топлива относится к утилизации вторичных энергоресурсов. Использование лесного топлива можно отнести к энергетике на возобновляемых источниках.

### 3.1.5. Отходы животноводства и сельского хозяйства

К органическим отходам животноводства и сельскохозяйственного производства относятся: экскременты животных и растительные материалы (солома, свекольная и картофельная ботва и другие растительные остатки, если они не используются непосредственно в качестве корма). Например, при производстве зерновых на каждую тонну продукта получается около 1,4–1,6 т соломы. Одна свинья в год выдает около 1,5 т экскрементов, корова – 11 т. Энергия растений, идущих на корм животным, используются последними лишь на 30–40%, остальная же часть органического вещества идет в навоз. Внесенная в почву 1 т свежего навоза под воздействием солнца, воздуха и воды, разлагается в аэробных условиях и отдает в атмосферу до 1600 МДж тепла.

В среднем в составе соломы, лузги подсолнуха и костры льняной содержится:  $C = 42,5\text{--}43,5\%$ ,  $H_2 = 4,9\text{--}5,4\%$ ,  $O_2 = 34,6\text{--}36,9\%$ ,  $N = 0,44\text{--}0,5\%$ ,  $S = 0,1\text{--}0,16\%$ , минеральных веществ 2,4–6,5%. Влажность этих отходов сельского хозяйства составляет 10–15%, выход летучих 80%, теплота сгорания 12,9–18,1 МДж/кг.

Недостатком соломы является содержание хлора  $Cl = 0,1\text{--}0,85\%$ , что сильно влияет на коррозию поверхностей нагрева. Кроме того,

температура плавления золы соломы ржи, овса и ячменя довольно низкая – 735–840°C, температура плавления золы соломы пшеницы – 1050°C. Наибольшая проблема при сжигании соломы – ее низкая плотность, у непрессованной соломы она всего 30–40 кг/м<sup>3</sup>, что удорожает транспортировку и складирование. Чаще всего солому транспортируют в прессованном виде.

При уборке зерновых влажность соломы 30–60%, для сжигания она пригодна при влажности до 20%. Более влажную солому надо просушивать до складирования, это предохранит ее от самонагрева и гниения при хранении.

Отходы сельского хозяйства, имеющие влажность менее 15%, можно утилизировать путем сжигания, как и древесную массу. Однако некоторые отходы сельского хозяйства и все отходы животноводства имеют достаточно высокую влажность (более 50%). Например, влажность навоза крупного рогатого скота – 89%, свиней – 91,5%, кур – 78%. Такие отходы целесообразно подвергать анаэробному брожению или ферментации. Однако следует учитывать, что некоторые органические соединения растений (например, лигнин) и все неорганические составляющие не поддаются сбраживанию.

### **3.1.6. Энергетическое топливо**

*Энергетическое топливо* – топливо, производимое из быстрорастущих деревьев и кустарников, которые выращиваются специально для энергетических целей (например, быстрорастущая ива, топинамбур). Предприятие, занимающееся производством топливной биомассы, называют энергетической фермой (плантацией).

Топливную биомассу можно поделить на два вида:

- котельное топливо (произведенная биомасса утилизируется сжиганием или пиролизом без специальной переработки);
- моторное топливо (произведенная биомасса перерабатывается выжиманием (экстракцией) с целью получения горючего масла).

Весьма перспективным для Беларуси является создание энергетических плантаций на основе быстрорастущих и высокоурожайных растений древесных и кустарниковых пород. По данным Ботанического сада, с 1 га земли возможно получение 100–150 т растительной массы типа топинамбура. Это означает, что энергетический потенциал 1 га составляет 10 т у. т. в год.

Энергетические плантации могут производиться на выработанных торфяниках (площадь 200 тыс. га) и на нерационально используемых площадях в сельскохозяйственном производстве и лесном хозяйстве.

В некоторых случаях жидкие разновидности топлив могут быть получены прямо от растений путем экстракции (выжиманием). Более 150 видов растущих в мире растений способны вырабатывать масла. Можно разделить масленичные растения на следующие категории: семена (подсолнечник, лен, рапс, горчица); орехи (фундук, желуди, земляные орехи – 50% содержания масла); плоды (соя, хлопок); листья (рицинус); ствол (смола сосны, ели).

Растительные масла являются высокоэнергетическим сырьем – теплота сгорания растительного масла 37 МДж/кг, или 34 МДж/л (например, теплота сгорания дизельного топлива 42 МДж/кг, или 34 МДж/л). Растительное масло может быть непосредственно использовано в качестве дизельного топлива в двигателях, оснащенных специальной системой подачи, однако при этом образуется дым и при температуре ниже +20°C масло может затвердеть. Добавив в масло 20% метилового или этилового спирта, можно получить прекрасное дизельное топливо (биодизель).

Основной целью энергетической фермы могло бы быть исключительно производство топлива, но более выгодно найти наилучшее соотношение между получением полезных продуктов из различных видов биомассы.

Наиболее характерным примером энергетической фермы для Беларуси представляет собой предприятие по выращиванию и комплексной переработке рапса с целью получения пищевого масла, биодизеля, глицерина, жмыха (котельного топлива).

Достоинства агрохимического способа получения биотоплива:

- огромные потенциальные запасы;
- растительное масло не токсично, не огнеопасно, не имеет неприятного запаха, не содержит сернистых соединений;
- экологичность методов производства топлива, возможность использования бросовых земель;
- большой опыт выращивания сельскохозяйственных культур.

Недостатки – высокая трудоемкость и возможность конкуренции с производством пищевых культур.

### **3.1.7. Твердые бытовые и промышленные отходы**

В последние десятилетия во всем мире произошло резкое увеличение объемов образования твердых бытовых отходов. В настоящее время масса потока твердых бытовых отходов, поступающего ежегодно в биосферу, достигла почти геологического масштаба и составляет около 400 млн. т в год. Влияние потока твердых бытовых отходов

остро сказывается на глобальных геохимических циклах органического углерода. Так, масса этого элемента, поступающего в окружающую среду с отходами, составляет примерно 85 млн. т в год, в то время как общий естественный приток углерода в почвенный покров планеты составляет лишь 41,4 млн. т в год.

Основные источники углеродсодержащих отходов в Республике Беларусь, состав и теплота сгорания приведены в табл. 3.3. Удаление и обезвреживание отходов – наиболее значимый для города неблагоприятный экологический фактор, важнейший показатель санитарного благополучия населения, общественной гигиены. Отходы делятся на бытовые (как правило, твердые) и промышленные (твердые и жидкие).

Таблица 3.3

**Источники углеродсодержащих отходов**

Наименование источника отхода	Состав отхода	Теплота сгорания, МДж/кг
Твердые бытовые отходы	Органические вещества 60–70% (углерода 35%), зольность 30–40%, влажность общей массы 40–50%	2,5–9
Промышленные отходы нефтеперерабатывающих заводов, железнодорожных предприятий, нефтебаз и ремонтных заводов	Нефтепродукты 20–30%, вода 20–30%, механические примеси 40–50%	10–15
Промышленные отходы автомобильных баз (отработанные масла и смазки, бумажные фильтры машин и механизмов)	Нефтепродукты 90%, влага 8%, металлические и минеральные включения 2%	23–27
Промышленные отходы железнодорожных служб (старые деревянные шпалы)	Древесина 75%, креозот 5%, влага 20%	19–23

Свойства твердых бытовых отходов, закономерности изменения этих свойств в настоящее время мало изучены. Существующая информация не полна и не систематизирована. Отсутствуют проверенные в производстве технологии обезвреживания большинства токсичных продуктов. До настоящего времени перерабатываются в основном нейтральные либо малотоксичные отходы.

Имеются следующие методы ликвидации твердых отходов:

- 1) захоронение на полигонах;
- 2) термическая переработка;

3) сортировка и переработка органического сырья в органическое удобрение (анаэробная переработка);

4) химические, биологические и физико-химические методы.

Жидкие промышленные отходы, как правило, сжигаются.

В европейских государствах 40% отходов превращают биологической обработкой в органические удобрения, 10% сжигают на мусоросжигательных заводах, 50% отходов захоранивают.

В Республике Беларусь среди методов ликвидации отходов в настоящее время первое место принадлежит полигонам твердых бытовых отходов, на которые вывозят порядка 90–95% отходов (сжигание составляет не выше 10%). При этом следует понимать, что когда твердые бытовые отходы складировются, то они не обезвреживаются. Полигоны отходов – это мины замедленного действия, которые будут действовать десятки лет, нанося огромный экологический и социальный ущерб природной среде и населению.

По результатам различных исследований можно отметить следующие негативные факторы воздействия полигонов отходов на окружающую среду.

1. Сильное поверхностное загрязнение почв на больших территориях, загрязнение подземных вод и грунтов до глубины более 20 м. При этом установлено, что в состав загрязняющих компонентов при многократном превышении предельно допустимых концентраций входят: Co, W, Mo, V, Zr, Pb, Bi, Zn, Li, Sr Fe, Ba, Cr, P, Ti, Ni, нитраты, аммоний, Cl (от 2 до 100 предельно допустимых концентраций) и т. д. Если вблизи полигона твердых бытовых отходов расположены и эксплуатируются артезианские водонапорные скважины, то водяные потоки испытывают постоянное загрязнение фильтратами полигона.

2. Влияние выделяемого биогаза (смеси метана, кислорода, углекислого газа), вызванное биохимическим разложением органического материала.

– Токсичные выделения биогаза превышают санитарные нормы и могут вызвать удушье человека. Известно довольно много случаев отравлений при техническом обслуживании заглубленных инженерных коммуникаций, которые сопровождались смертельными исходами.

– Биохимическое разложение и химическое окисление материала свалки может сопровождаться образованием очагов выделения тепла с повышением температур до 75°C, т. е. возможно самовозгорание отходов. Частые пожары на полигонах также в основном являются последствием стихийного, бесконтрольного распространения свалочного газа.



– При накоплении свалочного газа могут формироваться взрыво- и пожароопасные условия в зданиях и сооружениях, расположенных вблизи захоронений твердых бытовых отходов.

– Гниение твердых бытовых отходов сопровождается распространением запаха на расстояние более 1 км.

– Свалочный газ является парниковым газом, который усиливает эффект изменения климата Земли в целом.

Западные страны начали активно заниматься переработкой промышленных и твердых бытовых отходов еще в 60-е годы прошлого столетия. В течение 10 лет в США, Японии, Германии, Франции и Швейцарии была создана разветвленная инфраструктура по сбору, сортировке и первичной переработке отходов и построены высокопроизводительные мусоросжигательные заводы. В России мусоросжигательные заводы появились только 80-е годы прошлого столетия в Москве, Санкт-Петербурге и некоторых других городах. В результате отсутствия первичной сортировки отходов заводы по сжиганию мусора работают эпизодически, объем сжигания не превышает 2% от объема твердых бытовых отходов.

Несмотря на разнородность состава твердых бытовых отходов, их можно рассматривать как низкосортное топливо. Термическая переработка твердых бытовых отходов не только их обезвреживает, но и позволяет получать тепловую энергию, а также извлекать имеющийся в них черный металлолом. Сжигание твердых бытовых и промышленных отходов сложно технически и требует дорогостоящей газоочистки. Если отходы содержат более 14% углеводов, то их рациональнее подвергать термической переработке, получая при этом тепловую энергию, если менее 14% – то для обезвреживания таких отходов лучше использовать химические, биологические или физико-химические методы.

Другим направлением утилизации твердых бытовых отходов являются сортировка и предварительная подготовка твердых бытовых отходов, а затем анаэробная переработка в органическое удобрение (компост). Однако в Республике Беларусь не развита система целевого сбора отсортированного и незагрязненного вторичного сырья у населения, что влечет за собой необходимость строительства дополнительного завода по сортировке мусора для разделения и сбора вторичного сырья: пленка, бумага, черные и цветные металлы, стекло. К сожалению, из-за низкой экологической культуры населения в бытовые отходы попадают краски, батарейки, люминесцентные лампы и многое другое, что может привести к перенасыщению компоста тяжелыми металлами и вредными компонентами.

### 3.1.8. Торф

В Республике Беларусь имеется в наличии большое количество торфа, который может использоваться в качестве топлива. Залежи торфа возникли из остатков растений при их частичном разложении в среде с избытком воды и недостатком кислорода. В среднем в составе сухого торфа содержится:  $C = 58\%$ ,  $H_2 = 6\%$ ,  $O_2 = 33\%$ ,  $N = 2,5\%$ ,  $S = 2,5\%$ . Содержание золы  $5\%$ , влаги  $35\text{--}60\%$ , теплота сгорания  $9,2\text{--}11,9$  МДж/кг. Торф обычно относится к медленно возобновляемым биотопливам – ежегодно каждый гектар болот прирастает приблизительно на одну тонну торфа.

Общая площадь торфяного фонда по Республике Беларусь составляет  $2,4$  млн. га с геологическими запасами торфа  $4$  млрд. т. Однако все эти запасы нельзя рассматривать как возможные для разработки, так как в их состав входят также заолненные виды торфа, мелкозалежные и малые торфяные месторождения, торфяные залежи, выполняющие существенные природоохранные функции. Оценка современного состояния и практика использования торфяных месторождений свидетельствуют о том, что разрабатываемый торфяной фонд может составить  $1,1\text{--}1,2$  млрд. т с извлекаемыми запасами  $0,6\text{--}0,8$  млрд. т.

Из всех видов твердых горючих ископаемых торфяные ресурсы являются наиболее изученными и востребованными экономикой Беларуси. Они активно разрабатывались многие десятилетия, а в 50-е годы XX столетия торфа добывали более  $20$  млн. т в год, он являлся основным видом топлива в производстве тепловой и электрической энергии. Тогда доля торфа в энергетическом балансе республики составляла  $64\%$ .

В настоящее время торфопредприятия разрабатывают  $46$  торфяных месторождений, общая площадь которых составляет  $37,4$  тыс. га с запасами торфа в  $101,8$  млн. т. В 2006 году добыто  $2,3$  млн. т торфа, в том числе  $2,1$  млн. т – топливной группы.

Такое падение добычи торфа связано и с тем, что все ресурсы крупных месторождений уже исчерпаны и в настоящее время на территории страны не осталось таких мест, на базе которых можно построить крупное перерабатывающее предприятие. А технологий строительства мобильных торфяных заводов у нас нет.

Концепцией энергетической безопасности определено увеличение добычи торфа до  $1,5$  млн. т у. т., или  $4,3\text{--}4,4$  млн. т в год. Однако во всем должен быть разумный подход – увеличение производства торфяной продукции не должно идти во вред окружающей среде. Водно-болотные угодья являются неотъемлемой частью экологического равновесия.

Проведенными исследованиями доказано, что имеющихся геологических запасов торфа, с учетом их ежегодного прироста на 1 млн. т, достаточно для разработки и использования в энергетике и сельском хозяйстве в объемах около 15 млн. т в год на ближайшие 100 лет без изъятия торфяных месторождений из действующих природоохранных земельных фондов.

Некоторые эксперты полагают, что сжигание торфа является экономически неэффективным. Однако, например, в Финляндии, с разрешения экологов, добычу торфа в год довели до 15 млн. т. Доля его в производстве тепловой энергии составила 17,5%, электрической – 5,3%.

Что касается последствий осушения и торфодобычи, то в Беларуси есть технологии отработки выбывших из эксплуатации торфяных месторождений либо под лесопосадки, если они подходят по гидрологическим условиям, либо под строительство водоемов, или под сельскохозяйственные угодия. В некоторых случаях можно просто проводить повторное заболачивание.

Торф может быть использован в той же сжигающей установке, что и щепа, так как теплота сгорания практически такая же, как у топлива из древесной массы. Торф в качестве топлива может использоваться двумя способами: непосредственно как высушенный торф либо в форме брикетов. Торф в виде брикетов обладает низкой влажностью (12–15%) и высокой теплотой сгорания (19 МДж/кг). Кроме того, из торфа можно получать среднекалорийный генераторный газ.

Однако с переработкой торфа связано также множество проблем. Торф должен добываться исключительно в летние месяцы и высушиваться на солнце настолько, насколько позволяют погодные условия. Несмотря на это, в торфе будет содержаться достаточно много влаги, которую можно удалить «выжиманием» или же просушиванием на открытом воздухе. У торфа большая зольность и высокий процент содержания шлаков по сравнению с другими видами биотоплив, он содержит также песок и частицы грунта, что создает проблемы с ошлакованием перерабатывающих устройств. Торф может самовоспламениться, а следовательно, хранение его должно осуществляться в контейнерах с огнеупорными стенами для предотвращения возможного распространения огня.

Между тем следует учитывать и то, что торф – комплексное сырье. Современные технологии позволяют из торфа производить органические и органоминеральные удобрения, удобрительные смеси и мелиоранты, биостимуляторы, ростовые вещества и кормовые добав-

ки, сорбционные материалы для поглощения вредных и токсичных веществ, в том числе тяжелых металлов и радионуклидов, торфощелочные реагенты для буровых работ и производства строительных материалов, лекарственные средства, изделия бытовой химии, косметики, полиграфии и другие продукты. Продукты, полученные из торфа, востребованы на зарубежных рынках. Каждый год из Республики Беларусь экспортируется (в основном в Швецию и Финляндию) более 200 тыс. т торфа. Так что благодаря торфу можно не только получать энергию, но и зарабатывать валюту.

Государственной программой «Торф» на 2008–2010 годы и на период до 2020 года предусмотрено обеспечение потребности в топливном торфе за счет увеличения к 2010 году добычи торфа до 1,15 млн. т у. т., к 2015 – до 1,4 млн. т у. т., к 2020 году – до 1,5 млн. т у. т. Прогноз добычи топливного торфа до 2020 года представлен в табл. 3.4.

Таблица 3.4

**Прогноз добычи топливного торфа**

Торф	Год									
	2006		2008		2010		2015		2020	
	тыс. т	тыс. т у.т.	тыс. т	тыс. т у.т.	тыс. т	тыс. т у.т.	тыс. т	тыс. т у.т.	тыс. т	тыс. т у.т.
Топливный для брикетирования	2109,3	717,2	2536	862	2927	1000	3047	1036	3079	1047
Топливный для потребителей	23,9	8,1	140	48	344	120	921	313	1081	368
Кусковой	9,5	3,9	22	9	66	29	85	35	165	68
Топливный для производства пеллет	–	–	2	1	4	1	47	16	52	18
<i>Всего</i>	2142,7	729,2	2700	920	3341	1150	4100	1400	4377	1500

В Государственной программе «Торф» приняты в том числе следующие решения топливно-энергетических проблем.

1. Разработать и внедрить опытно-промышленные водогрейные котельные установки с топкой кипящего слоя для сжигания фрезерного торфа и его смесей с другими видами топлива тепловой мощностью 1,0–1,5 МВт.

2. Разработать технологический процесс и экспериментальное оборудование для получения из торфа генераторных среднекалорийных газов для двигателей внутреннего сгорания.

3. Разработать составы и технологические процессы получения строительных материалов с использованием золы от сжигания торфа.

### **3.1.9. Белорусские горючие сланцы**

Одним из путей обеспечения энергетической безопасности страны является максимальное использование возможности местных органических топлив. Наряду с утилизацией возобновляемых источников энергии для нашей страны может быть актуальна переработка бурых углей и горючих сланцев.

Горючие сланцы представляют собой осадочные минеральные образования, пропитанные органическими веществами, содержащими клетчатку, воск, жирные кислоты и т. д., и, в отличие от углей, характеризуются:

- наличием значительного (до 82%) минерального балласта, в составе которого содержится до 45% кальциевых соединений, в том числе много карбонатов;
- высокой теплотой сгорания горючей массы (25–40 МДж/кг) вследствие высокого содержания водорода (до 8%) в органической массе, хотя рабочая масса большинства сланцев имеет теплоту сгорания всего 4–9 МДж/кг;
- высоким (до 90%) выходом летучих;
- повышенным (до 7%) содержанием серы.

Возможность получения с применением определенных технологий из органической части горючих сланцев жидких и газообразных углеводородов, при условии утилизации зольного остатка, заставляет по-новому взглянуть на этот незаслуженно забытый источник энергии.

В Республике Беларусь имеются запасы горючих сланцев, которые составляют 11 млрд. т. Общий потенциал их равен 2420 млн. т у. т., технологически возможный на данный момент – 792 млн. т у. т. (что может обеспечить примерно 17 лет потребности республики в энергии). Наиболее пригодные для эксплуатации два месторождения в пределах Припятского сланцевого бассейна – Любанское (200 млн. т у. т.) и Туровское (520 млн. т у. т.).

Мощность слоев Любанского месторождения составляет около 1,1 м, глубина залегания – от 221 до 473 м. Мощность слоев Туровского месторождения составляет около 1,2 м, глубина залегания – от 66 до 507 м. Эксплуатация Туровского месторождения может осуществляться шахтным способом с годовой производительностью отдельной шахты 4,5 млн. т (0,4 млн. т у. т.) и сроком службы 45 лет.

Состав рабочей массы белорусских сланцев: углерод  $C^p = 9,5\text{--}18,8\%$ , водород  $H^p = 1,1\text{--}3,6\%$ , азот  $N^p = 0,12\text{--}0,19\%$ , кислород  $O^p = 0,8\text{--}16,0\%$ , сера  $S^p = 1,5\text{--}7,0\%$ . Содержание золы  $A^p = 61,4\text{--}82,3\%$ , содержание влаги  $W^p = 5,8\text{--}10,6\%$ , выход летучих  $V^p = 80\text{--}90\%$ . Теплота сгорания  $4,2\text{--}9,6$  МДж/кг.

Основными направлениями использования горючих сланцев являются:

1) энергетическое – использование сланцев в качестве твердого топлива;

2) энерготехнологическое – горючие сланцы подвергаются термическому разложению, в результате чего выделяются жидкие и газообразные горючие продукты: смола, газовый бензин, газ и др;

3) энергоклинкерное – пылевидные горючие сланцы сжигаются в топках котельных агрегатов с расплавом золы для получения клинкера высокомарочного сланцевого цемента;

4) энергохимическое – объединяющее все предыдущие направления и представляющее собой наиболее прогрессивное комплексное использование горючих сланцев с целью получения широкой гаммы продукции: энергии, химических продуктов и строительных материалов.

Использование сланцев в качестве топлива в электроэнергетике разных стран до сих пор не находило применения, за исключением Эстонии и России. Российскими специалистами были созданы электростанции на среднекалорийных (теплота сгорания  $8\text{--}9$  МДж/кг) сланцах Прибалтики (Эстонская и Прибалтийская ГРЭС, ТЭЦ Ахтме, ТЭЦ Кохтла-Ярве). Столь незначительное использование горючих сланцев в качестве топлива для электростанций объясняется низким КПД энергоустановок и значительными эксплуатационными трудностями. Это связано с тем, что по своим качествам сланцы не являются эффективным топливом из-за низкой теплоты сгорания и высокой зольности. Проектный расход топлива на отпущенную электроэнергию на энергоблоках составлял  $409$  г у.т./кВт·ч, что соответствовало КПД ТЭС всего  $30\%$ ; практически эти показатели были еще хуже.

Сланцевая зола делится на летучую – улавливаемую при газоочистке фильтрами ( $\sim 64\%$ ) и крупную – выпадающую на дно топки ( $\sim 36\%$ ). Высокое содержание сравнительно низкоплавкой золы ( $1030\text{--}1170^\circ\text{C}$ ) сопряжено с опасностью шлакования, с засорением и износом поверхностей нагрева, с повышением потерь от механического недожога, а также с трудностями организации золоулавливания

и золоудаления. Кроме того, летучая зола горючего сланца сильно засоряет воздушный бассейн. Вместе с дымовыми газами выбрасывается значительная масса золы и окислов серы. Естественно, сжигание в топках котельных агрегатов низкоэффективных белорусских сланцев чрезвычайно затруднительно, и выработка энергии на них окажется довольно дорогой.

Развивающаяся в последние 20 лет технология сжигания топлива в «кипящем» слое (классическом или циркулирующем) при атмосферном давлении позволяет использовать горючие сланцы любой калорийности с удовлетворительными экологическими показателями. Однако такая технология ограничивает единичную мощность котла и недостаточно эффективна.

### **3.2. Утилизация древесного топлива**

#### **3.2.1. Установка для сжигания биотоплива**

Котельной установкой называется комплекс устройств и агрегатов, предназначенных для сжигания (преобразования химической энергии в тепловую) топлива. В котельной установке при сжигании топлива выделяемая теплота нагревает продукты сгорания, а затем теплота передается рабочему телу, которым обычно является вода.

Задачи, решаемые в котельной установке:

- 1) подать топливо и окислитель (воздух);
- 2) обеспечить сжигание топлива;
- 3) обеспечить отдачу тепла от продуктов сгорания к рабочему телу;
- 4) нагреть воду (или пар) до необходимой температуры.

Котлом называется устройство, служащее для сжигания топлива и получения пара (паровой котел) или горячей воды (водогрейный котел). Котел состоит из следующих основных элементов (рис. 3.3): топка 1 – устройство для сжигания топлива; барабан 2 – емкость для размещения рабочего вещества (воды); поверхности нагрева 3, представляющие собой систему труб, в которых происходит нагрев и парообразование рабочего вещества (воды); водяной экономайзер 4 – устройство для подогрева продуктами сгорания питательной воды перед подачей ее в барабан; пароперегреватель 5 – устройство для нагрева пара, выходящего из барабана до температуры выше температуры кипения; воздухоподогреватель 6 – устройство для подогрева воздуха продуктами сгорания перед подачей его в топку котла.

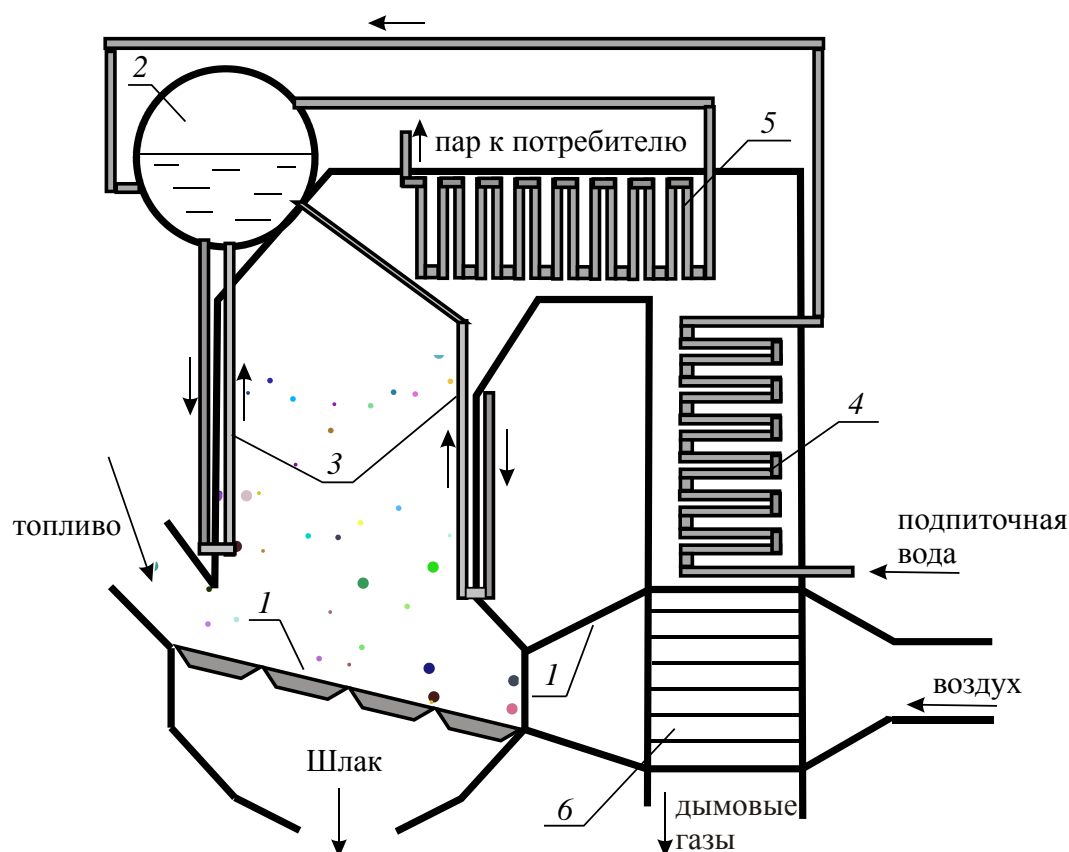


Рис. 3.3. Котел и его основные элементы

Поверхности нагрева топki воспринимают тепло омывающих их топочных газов и излучаемое раскаленными частицами топлива и пламенем, возникающим при сгорании горючих газов, выходящих из слоя топлива. Зола и шлак удаляются из зоны горения либо вручную, либо посредством механического колосникового или другого устройства.

### 3.2.2. Этапы сжигания биотоплива

Процесс сжигания твердого топлива включает несколько этапов с различной температурой горения.

**1. Высушивание топлива.** Испарение влаги происходит уже при достаточно низкой температуре (50–100°C). Часть энергии, выделяемой в процессе горения, уходит на испарение воды, что уменьшает температуру в топке, замедляя процесс сжигания топлива. В котлах на древесном топливе поддержание процесса горения становится невозможным, если влажность древесины превышает 60%. Испарение содержащейся во влажной древесине влаги и последующий нагрев водяного пара требуют значительных затрат энергии, что приводит к падению температуры ниже минимального



уровня, требуемого для обеспечения процесса горения. Следовательно, влажность является одной из наиболее важных переменных характеристик топлива.

**2. Пиролиз (газификация).** Процесс пиролиза начинается при нагревании твердого органического вещества до температуры 100–105°C. Летучие вещества (прежде всего углеводородные соединения) начинают испаряться. Структура материала топлива изменяется, и его поверхность становится пористой. Газифицированная древесина превращается в раскаленный древесный уголь.

**3. Воспламенение твердого топлива** происходит при температуре 200–300°C в зависимости от вида топлива. Воспламеняется сухой торф при температуре 225–280°C, хвойная древесина при 220°C, листовая – при 300°C.

**4. Сгорание летучих компонентов.** При температуре 500–600°C начинается процесс горения летучих компонентов, которые находятся на этом этапе в газообразной форме. Содержание летучих компонентов в горючем веществе составляет 75%, поэтому сжигание твердого топлива – это в основном сжигание газов.

**5. Дождог.** При температуре 800–900°C происходит сгорание твердого углерода и смолы.

**6. Образование шлака.** При температуре выше 1000°C негорючие компоненты начинают плавиться и превращаются в жидкую вязкую массу – шлак.

Все эти стадии при сжигании топлива происходят одновременно. На поверхности древесного топлива после испарения влаги происходит газификация, а в то же время глубже, внутри древесины, растет температура, что приводит к испарению влаги из ее внутренних частей. По мере окончания процесса испарения влаги зона пиролиза распространяется внутрь древесины. Газ, образованный таким образом, воспламеняется над топливом и передает тепло для протекания процессов испарения и пиролиза другим кускам древесного топлива. Процесс сжигания происходит непрерывно.

Эффективное и полное сгорание является необходимым условием использования древесины в качестве экологически приемлемого вида топлива. Процесс сгорания должен обеспечивать высокую степень использования энергии и, следовательно, полную утилизацию древесины и не должен вызывать образования нежелательных в экологическом отношении соединений. Сгорание является полным, если все горючие компоненты топлива полностью прореагировали с кислородом. Недостаток воздуха препятствует выделению энергии

топлива, которая связывается веществами, содержащимися в топливе, например окисью углерода. В этом случае сгорание является неполным.

Теоретически необходимым является такое количество воздуха, при котором обеспечивается полное сгорание всех горючих компонентов топлива. Для обеспечения полного сгорания топлива обычно подводят больше, чем теоретически необходимо воздуха. Отношение действительно поданного воздуха к теоретически необходимому называется **коэффициентом избытка воздуха**:

$$\alpha = V / V^0.$$

Для древесного топлива требуемый коэффициент избытка воздуха составляет от 1,25 до 1,40.

При нехватке воздуха ( $\alpha < 1$ ) топливо не сгорает полностью. Это называется **химическим недожогом**. **Механический недожог** – это процесс неполного сгорания топлива из-за его размеров, т. е. невозможность кислорода вступить в реакцию с углеродом. Соответственно, механический недожог возможен только при сжигании твердых топлив. В практике на установках, работающих на твердом топливе, невозможно обеспечить полное сгорание топлива из-за трудностей, связанных с получением эффективной топливной смеси и подачей необходимого количества воздуха в течение ограниченного периода времени.

При избытке воздуха ( $\alpha \gg 1$ ) повышаются потери тепла с уходящими дымовыми газами (снижается КПД котла) и увеличивается образование термических оксидов азота  $\text{NO}_x$ .

Показателем эффективности процесса является содержание  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$  в отходящих газах. При сжигании топлива необходимо обеспечить содержание максимального количества  $\text{CO}_2$  и отсутствие  $\text{CO}$  в отходящих газах (признак  $\text{CO}$  в дымовых газах – черный дым).

Выбросы, образующиеся при неполном сгорании, могут быть вызваны:

- неправильным смешением воздуха и топлива в топливной камере, в результате чего образуются локальные зоны с недостатком воздуха;
- недостаточным количеством кислорода;
- низкой температурой горения;
- недостаточным временем пребывания в топке.

Эти переменные величины связаны друг с другом, хотя в случаях, когда имеется достаточное количество кислорода, наиболее

важной переменной является температура, оказывающая экспоненциальное воздействие на скорость реакции. Оптимизация этих переменных позволяет снизить уровни всех выбросов, вызываемых неполным сгоранием.

**Температура горения** зависит прежде всего от двух факторов: количества подаваемого воздуха  $\alpha$  и влажности топлива  $W^p$ . Если пренебречь теплоемкостью золы, то температура горения (температура продуктов сгорания) рассчитывается по формуле

$$t^{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}}^p}{c_p m_{\text{г}}} + t_0,$$

где  $c_p$ ,  $m_{\text{г}}$ ,  $t_0$  – удельная массовая изобарная теплоемкость, масса дымовых газов и температура подаваемого на горение воздуха. Значение удельной изобарной теплоемкости дымовых газов среднее в диапазоне 1000–2000°C и соответствует 1,34 кДж/(кг °С).

Масса дымовых газов, образующихся при полном сгорании топлива, при избытке воздуха  $\alpha$  рассчитывается по формуле

$$m_{\text{г}} = 1 + \alpha m_{\text{в}}^0,$$

где  $m_{\text{в}}^0$  – масса воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг древесного топлива.

Тогда приблизительно температуру горения можно определить по формуле

$$t^{\text{гор}} = 14,0 \cdot 10^3 \frac{100 - 1,14 \cdot W^p}{100 + 6,05 \cdot \alpha \cdot (100 - 1,01 \cdot W^p)} + t_0.$$

При  $\alpha = 1$  и  $W^p = 0$  максимальная температура горения (жаропроизводительность) древесного топлива составляет  $t^{\text{гор}} = 1986^\circ\text{С}$ .

Эффективность топki определяется на основе уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{н}}^p = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{п.с}} + Q_{\text{хим}} + Q_{\text{мех}} + Q_{\text{золы}},$$

где  $Q_{\text{н}}^p$  – низшая теплота сгорания топлива;  $Q_{\text{пол}}$  – полезно используемое тепло;  $Q_{\text{п.с}}$  – тепло, расходуемое на нагрев продуктов сгорания;  $Q_{\text{хим}}$  – потери тепла от химического недожога;  $Q_{\text{мех}}$  – потери тепла от механического недожога;  $Q_{\text{золы}}$  – потери тепла со шлаком и золой.

Коэффициент полезного действия топki определяется по формуле

$$\eta_{\text{т}} = Q_{\text{пол}} / Q_{\text{н}}^p.$$

### 3.2.3. Технологии сжигания биотоплива

Процессы горения ископаемых видов топлива и биотоплива существенно отличаются, так как ископаемые виды топлива по сравнению с большинством видов биотоплива имеют более высокое качество. При этом существует большое различие в технологии сжигания различных типов биотоплива, главным образом, в зависимости от плотности, влажности и фракции биотоплива.

Для поддержания непрерывного процесса сжигания необходимо выполнение нескольких основных условий:

- должна быть обеспечена адекватная смесь топлива и окислителя (воздуха) в контролируемом соотношении;
- пламя в топке котла должно передавать часть своего тепла поступающему топливу с целью обеспечения непрерывного процесса сжигания.

Важно понимать, что газы сгорают в виде пламени, которое нагревает твердые частицы, и что при сжигании биотоплива приблизительно 80% энергии выделяется в виде газов, а оставшаяся часть – в виде древесного угля.

При смешивании топлива с воздухом важно достичь хорошего контакта между кислородом воздуха и горючими компонентами древесины. Чем лучше контакт, тем быстрее и более полно происходит сгорание. Если топливо находится в газообразной форме, как природный газ, смешивание является оптимальным. При этом мы имеем два газообразных вещества, которые могут быть смешаны точно в необходимом соотношении. Сжигание тогда происходит быстро, и управление процессом горения также является быстрым, так как мы можем вводить больше или меньше топлива. С целью достижения таких же условий для древесины необходимо распыление в виде очень мелких частиц (пыли). Эти частицы будут следовать за передвижением воздуха. Таким образом, можно достичь хорошего смешивания и сжигания, подобного сжиганию газа или мазута. Однако производство древесной пыли является очень дорогостоящим процессом, и поэтому котлы, сжигающие древесную пыль, используются в ограниченной степени. На практике размер используемого древесного топлива варьируется в диапазоне от щепы до бревен. По этой причине технология сжигания древесины и других твердых видов топлива является более сложной, по сравнению с технологиями сжигания газа или мазута.

Фундаментальная разница между сжиганием биотоплива и ископаемого топлива заключается в температуре горения. Максимальная температура горения (жаропроизводительность) древесного топлива

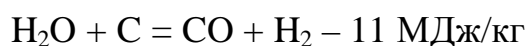
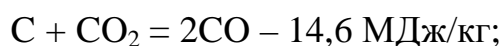
зависит от его влажности и зольности. Жаропроизводительность абсолютно сухой древесины составляет 2022°C, что всего на 5% ниже, чем жаропроизводительность мазута. При влажности древесины 70% жаропроизводительность древесины понижается более чем в 2 раза. Горение влажного древесного топлива (древесной щепы, опилок с 50%-ной влажностью) происходит при температуре ниже 1100°C.

Температура горения имеет огромное значение для конструкции котла в целом. Если температура газов при горении высокая, тогда большая часть тепла, полученного в результате продуктов горения и перемещаемого в котел, будет доставляться посредством теплового излучения. Напротив, при низкой температуре газов передача тепла основана на газовой конвекции. Котел, построенный для жидкого топлива, имеет конструкцию, предназначенную в основном для восприятия теплового радиационного излучения. В котле для сжигания древесного топлива большая часть передачи тепла основана на газовой конвекции. Из-за этого топки для сжигания древесного топлива имеют большие габариты, чем топки для сжигания жидкого или газообразного топлива.

Если котел на жидком топливе или угле попытаться использовать для сжигания влажного древесного топлива, тепло дымовых газов не сможет передаваться в котел должным образом; газ сможет уйти из котла только при слишком высокой температуре. Это в огромной степени снижает эффективность работы котла, а самое главное то, что газ может быть настолько жарким, что возникнет пожар в дымовой трубе. Однако температура горения гранул или брикетов (сухого прессованного биотоплива) часто так высока, что они могут использоваться в котлах, предназначенных для сжигания жидкого или газообразного топлива.

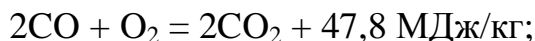
Необходимо отметить, что низкая температура горения (менее 1000°C) может являться положительным фактором, так как позволяет избежать проблемы ошлакования поверхностей теплообмена.

При сжигании сухого зольного топлива важной задачей является охлаждение золотниковой решетки для исключения ее зашлакования. Этого можно достичь, например, рециркуляцией газа (подачей части дымовых газов под колосниковую решетку). При этом наличие углекислого газа и водяного пара, содержащихся в дымовых газах, приведет к возникновению эндотермических реакций:



и к охлаждению слоя топлива и решетки.

Образовавшийся в результате реакций угарный газ и газообразный водород сгорают в топочном пространстве путем окисления кислородом, находящимся во вторичном воздухе



Таким образом затраченное в слое тепло на образование угарного газа и водорода высвобождается в топочном объеме.

#### **3.2.4. Особенности сжигания древесного топлива**

Ценность древесного топлива с экологической и технологической точки зрения состоит в малой зольности, отсутствии фосфора и незначительном содержании серы (за исключением хвойной коры) и большом содержании летучих веществ (до 85%).

Как известно, основной потерей тепла в любом котлоагрегате является потеря тепловой энергии с уходящими газами, которая определяется температурой дымовых газов на выходе из котла. При сжигании топлив, содержащих серу, во избежание сернокислотной коррозии (сернистой кислотой  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) хвостовых поверхностей нагрева температура дымовых газов поддерживается не ниже  $200^\circ\text{C}$ . При сжигании древесного топлива, не содержащего серу, температура уходящих дымовых газов может быть понижена до  $110^\circ\text{C}$ , что позволит существенно повысить КПД котлоагрегата.

Высокий выход летучих при сжигании древесного топлива позволяет иметь большую протяженность факела, в котором осуществляется сгорание выходящих из слоя горючих компонентов. Это создает условие для более равномерного распределения температур по высоте топочного пространства и, следовательно, для более эффективной работы радиационных поверхностей котлоагрегата.

Продукт коксования древесной биомассы – древесный уголь отличается высокой реакционной способностью по сравнению с ископаемыми углями. Высокая реакционная способность древесного угля обеспечивает возможность работы топочных устройств при низких значениях коэффициента избытка воздуха, что положительно влияет на эффективность работы котельных установок.

Недостаток древесного топлива – невысокая теплота сгорания, которая значительно снижается при увеличении влажности и зольности топлива. Влажность древесных отходов может изменяться в довольно широких пределах. В мебельном производстве и на деревообрабатывающих предприятиях этот показатель составляет 10–12%, на лесозаготовительных предприятиях 45–55%, влажность коры доходит до 80%.

Энергетическое использование древесных отходов путем сжигания является одним из эффективных способов ее утилизации на территории деревообрабатывающих предприятий. Однако отличительной особенностью древесной массы является способность интенсивно поглощать влагу из внешней среды. При длительном хранении за счет атмосферных осадков и других факторов древесные отходы быстро увлажняются (причем влажность древесных отходов может превысить влажность свежесрубленной древесины более 50%), что снижает эффективность их сжигания.

Увеличение влажности топлива снижает теплоту его сгорания, повышая расход теплоты на испарение влаги, пары которой уносятся с продуктами сгорания через дымовые трубы. Потери тепла  $Q$ , кДж/кг, при увлажнении топлива можно определить по формуле

$$Q = 0,042\Delta W (600 + 0,48t_{yx} - t_b),$$

где  $t_{yx}$  – температура уходящих дымовых газов;  $t_b$  – температура подаваемого на горение воздуха;  $\Delta W$  – изменение влажности топлива.

Повышение влажности топлива на 10–15% приводит к снижению КПД котла на 0,5–0,6%.

Вследствие повышения влажности топлива снижается температура горения, что приводит к сокращению тепловосприятия радиационными и конвективными поверхностями нагрева и в результате к повышению потерь тепла с уходящими газами и перерасходу топлива.

Содержание внутренней золы в древесине не превышает 2%. Однако внешние минеральные включения у древесных отходов иногда достигают 20%. Наличие золы приводит к увеличению расхода топлива за счет затраты дополнительного тепла на ее нагрев и плавление, а также к росту потерь от механического недожога топлива. Зола чистой древесины тугоплавка, и ее удаление из зоны горения не представляет трудностей. При сжигании древесных отходов с большими внешними минеральными включениями образуется спекшийся шлак, удаление которого затруднено. Образование шлака приводит к загрязнению поверхностей нагрева, ухудшению теплообмена и снижению КПД котла.

Следовательно, очень важным процессом при сжигании древесного топлива является качественная подготовка и переработка исходного сырья, обеспечивающего низкую влажность и малое содержание внешних минеральных примесей в древесных отходах.

Проведем анализ положительных сторон и недостатков при использовании наиболее распространенных видов древесного топлива: коры, пней и корней, дров.

**Кора** хвойных пород древесины иногда используется в качестве топлива для получения тепловой энергии. К очевидным достоинствам коры как топлива относится ее доступность и дешевизна, так как она не является дефицитным материалом, используемым в каком-либо серьезном производстве.

При этом у коры есть и существенные недостатки. Во-первых, она обладает более низкой теплотой сгорания, чем другие виды древесного топлива. Во-вторых, у коры всегда большая влажность (до 80%). Кроме того, при падении ствола на землю, практически невозможно избежать попадания в кору частиц песка и грунта. Следовательно, кора содержит песок и при сгорании возникают шлаки, которые приводят к износу утилизационного оборудования.

Утилизация **пней и корней** до настоящего времени не была целесообразной из-за высоких затрат, обусловленных наличием включений в виде земли и камней. Включения вызывают проблемы при сжигании, увеличивая зольность и риск шлакования и забивания колосников. Однако при продолжающемся повышении цен на топливо переработка пней и корней может стать экономически выгодной.

Нужно отметить, что **дрова** из древесины хвойных пород лучше всего подходит для сжигания. Это обусловлено тем, что древесина лиственных пород содержит больше тяжелых металлов и иных элементов в губительных как для самой установки, так и для окружающей среды. В отличие от хвойных, лиственные деревья в процессе роста впитывают все вещества, содержащиеся в почве, что и приводит к концентрации вредных элементов. Элементы, содержащиеся в древесине лиственных пород, также приводят к упоминавшейся проблеме ошлакования.

Важным недостатком свежей древесины является то, что она представляет собой материал, не прошедший «дезинфекцию» в процессе сушки. В этом материале споры функционируют, что может привести к следующим результатам:

- температура топлива возрастет и произойдет самовоспламенение;
- может возникнуть аллергическая реакция у обслуживающего котельные установки персонала.

### **3.2.5. Системы утилизации тепла и возможности повышения КПД установки**

В табл. 3.5 приведены возможные варианты повышения КПД установок, предназначенных для сжигания биомассы.



Таблица 3.5

**Влияние различных мер на тепловой КПД установок,  
предназначенных для сжигания биомассы**

Меры	Потенциальное повышение теплового КПД, %
Подсушка со снижением влажности с 50% до 30%	+8,7
Снижение содержания избытка воздуха в топочном газе на 1,0%	около +0,9
Снижении содержания минеральных примесей при сжигании коры с 10,0 до 5,0%	+0,3
Снижение температуры топочного газа на выходе из котла на 10°C	+0,8
Конденсация топочного газа (по сравнению с установками для сжигания топлива обычного типа)	среднее +17% максимальное +30

Подсушка биомассы обычно обеспечивает умеренное повышение КПД и снижение затрат. Вместе с тем этот метод позволяет предотвратить самовозгорание в кучах влажной коры, снизить потери сухого вещества, вызываемые процессами микробиологического разложения при хранении топлива, и уменьшить необходимый объем хранилища на установке. Предполагаемый процесс подсушки биомассы следует подвергнуть тщательному анализу с целью определения возможной экономической выгоды с учетом дополнительных инвестиционных и эксплуатационных затрат, включая затраты на электроэнергию, а также человеко- и машино-часы, необходимые для обслуживания процесса. В большинстве случаев подсушка биомассы является экономически оправданной только тогда, когда имеется дешевый или бесплатный подогретый воздух (примерами могут служить солнечные воздушные коллекторы и использование подогретого воздуха, получаемого из установок конденсации топочного газа). Анализ условий при открытом хранении показывает, что подсушивание куч биомассы в течение нескольких месяцев с использованием естественной конвекции в большинстве случаев является экономически невыгодным, так как потери от биологического разложения (1–2% веса в месяц) превышают полученное повышение КПД.

### **3.2.6. Неглубокая переработка топлива**

Весьма сложным является вопрос определения оптимальных размеров частиц, до которого надо измельчать топливо перед его сжиганием. Это обусловлено тем, что система технологии переработки топлива весьма дорогостоящая и экономически целесообразна только для мощных котельных.

После простой переработки древесного сырья можем иметь следующие виды топлива.

1. Дрова – куски дерева размером от 0,1 до 1 м, полученные путем пиления лесного топлива.

2. Топливная щепа – щепа размером до 5–100 мм, полученная путем измельчения лесного топлива.

3. Топливные брикеты – изделия цилиндрической формы (диаметром 30–100 мм, длиной до 300 мм), спрессованные методом экструзии из предварительно высушенной и измельченной древесины.

4. Топливные гранулы (пеллеты) – изделия цилиндрической формы (диаметром 6–12 мм, длиной до 20–50 мм), спрессованные методом экструзии из предварительно высушенной и измельченной древесины.

Физические характеристики отдельных видов топлива представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

**Физические характеристики отдельных видов топлива**

Древесный материал	Влажность, %	Теплота сгорания, МДж/кг		Объемная плотность, кг (вл.осн)/м <sup>3</sup>	Плотность энергии, кВт·ч/м <sup>3</sup>
		высшая	низшая		
Гранулированная древесина	10,0	19,8	16,6	600	2756
Древесная щепа (твердая древесина, подсушенная)	30,0	19,8	15,6	320	1094
Древесная щепа (твердая древесина)	50,0	19,8	7,9	450	1009
Древесная щепа (мягкая древесина, подсушенная)	30,0	19,8	15,6	250	855
Древесная щепа (мягкая древесина)	50,0	19,8	7,9	350	785
Кора	50,0	20,2	8,3	320	727
Опилки	50,0	19,8	7,9	240	538
Солома озимой пшеницы	15	18,7	14,4	120	482
Трава	18	18,4	13,7	200	750

**Древесная щепа** получается после переработки древесины рубительными машинами. По принципу действия рубительные машины для производства щепы подразделяются на дисковые, шнековые и барабанные. В дисковых рубительных машинах механизм резания выполнен в виде вращающегося стального диска 1, на торце которого

радиально закреплены 2–4 режущих ножа 2 (рис. 3.4, *а*). В шнековых рубильных машинах рабочий орган – конусообразный шнек с острыми концами. В барабанных рубильных машинах механизм резания выполнен в виде вращающегося барабана 1, на котором установлены режущие ножи 2 (рис. 3.4, *б*). Для получения однородной щепы барабанные машины снабжены ситом 4.

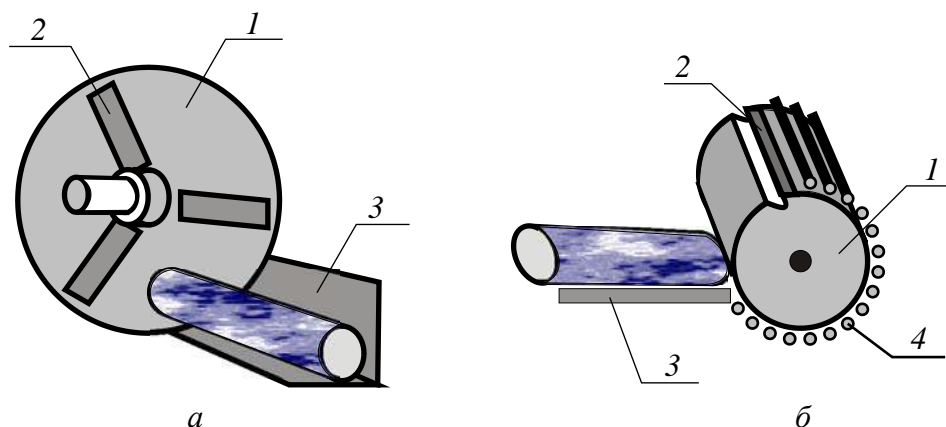


Рис. 3.4. Дисковая (*а*) и барабанная (*б*) рубильные машины

Дисковые и шнековые машины наиболее пригодны для переработки однородного сырьевого материала – такого, как целые деревья и очищенные от сучьев длинномерные сортименты. Барабанные рубильные машины не так чувствительны к неоднородности состава сырья, поэтому они также могут применяться для переработки лесосечных отходов. Однако у барабанных рубильных машин расход энергии на 50–70% выше, чем у дисковых машин. Большие рубильные машины оснащены одним-двумя устройствами 3, подающими сырьевой материал в рубильную машину. В шнековых рубильных машинах функцию устройства подачи выполняет шнековый нож. Однако производимая им щепа неоднородна по размеру и грубее, чем у дисковых и барабанных измельчителей.

Рубильные машины либо имеют собственный двигатель, либо приводится в действие от механизма отбора мощности трактора или грузового автомобиля. Производительность рубильной машины зависит от ее рабочих характеристик, характеристик сырья и условий складирования. Производительность рубильных машин малой мощности, установленных на автомобиле, составляет от 5 до 20 насыпных метров кубических древесины на один рабочий час. Производительность наиболее крупных рубильных машин может достигать 150 насыпных метров кубических древесины на один рабочий час.

Для дробления топлива, имеющего включения (продукты сноса деревянных строений, пни) используют дробилки. Наиболее распространены молотковые мельницы, валковые и щековые дробилки. В отличие от рубительных машин дробилки дают древесную массу, очень неоднородную по размеру и форме, а оборудование – мощное и дорогое.

Щепа обладает рядом недостатков: высокая исходная влажность (до 60%), малая насыпная плотность (коэффициент полнодревности 0,36–0,45), быстрое загнивание, самовозгорание. Достоинства – простота и дешевизна получения.

Опилки и щепа могут иметь различные характеристики в зависимости от способа их образовывания.

1. Отходы деревоперерабатывающих производств – сухое топливо с большой теплотой сгорания ( $\omega = 0–12\%$ ).

2. Отходы лесопилок – влажное топливо ( $\omega = 30–40\%$ ).

3. Отходы при сносе деревянных домов или вырубке деревьев в городе – влажное и химически загрязненное топливо.

**Производство древесных гранул. Гранулирование** – это процесс, заключающийся в измельчении продуктов и их прессовании. Процесс производства древесных гранул классически строится по следующей схеме.

- 1. Крупное дробление.** Крупные дробилки (как правило, молотковые мельницы) измельчают сырье для дальнейшей просушки. Измельчение должно дойти до размеров частиц не более  $25 \times 25 \times 2$  мм. Крупное дробление позволяет быстро и качественно высушивать сырье и подготавливает его к дальнейшему дроблению в мелкой дробилке.

- 2. Сушка.** Древесные отходы с влажностью более 15% очень плохо прессуются. Кроме этого, гранулы с повышенной влажностью не могут сжигаться в топках котлов. Поэтому сырье перед прессованием должно иметь влажность 8–12%. Сушилki бывают барабанного и ленточного типов. В сушилках ленточного типа сушка осуществляется паром, а в сушилках барабанного типа – либо паром, либо дымовыми газами. Сушилki ленточного типа дороже, но безопасней.

- 3. Мелкое дробление.** В пресс сырье должно поступать с размером частиц менее 4 мм. Поэтому мелкая дробилка измельчает сырье до необходимых размеров.

- 4. Водоподготовка.** Сырье с влажностью менее 8% плохо поддается склеиванию во время прессования. Поэтому при необходимости слишком сухое сырье увлажняют. Водоподготовку осуществляют и паром, и водой. Пар применяют для смягчения древесины твердых пород.

**5. Прессование.** Для прессования пеллетов применяют цилиндрические матричные или плоскоматричные прессы. В ходе прессования под высоким давлением древесной массы трение между частицами приводит к росту температуры, клеточная структура разрушается, лигнин дерева размягчается и склеивает прессуемые частицы. Чем мощнее сила прессования, тем больше температура сырья, тем лучше гранулы по качеству.

**6. Охлаждение и очистка.** В процессе прессования температура сырья достигает 70–90°C. Охлаждение нужно для прохладного осушения гранул после прессования. Также в схеме после охлаждения могут быть использованы циклоны для очистки готовых гранул от пыли, что существенно улучшает качество продукции.

Некоторые очевидные преимущества использования топливных гранул и брикетов:

- при производстве гранул (брикетов) объем опилок значительно уменьшается, что снижает затраты на перевозку топлива и его складирование;
- при хранении гранулы (брикеты) не разлагаются биологически, не вызывают аллергической реакции и, следовательно, их можно дольше хранить;
- однородная влажность и размер кусков прессованного топлива позволяет точнее регулировать режим горения в топке, обеспечивая тем самым более высокий КПД;
- подача топлива в горелку котла может быть автоматизирована;
- сжигатели для гранул легко устанавливаются на котлы взамен отработанных горелок для жидкого и газообразного топлива с сохранением высокого уровня автоматизации.

Недостаток прессованного топлива – более высокая стоимость.

### **3.3. Термохимические способы переработки биотоплива**

#### **3.3.1. Пиролиз (сухая перегонка)**

Наиболее научно и технически разработанными способами энергетического использования древесного топлива является его прямое сжигание в топках и пиролиз. Особо привлекателен второй метод, так как он является экологически чистым и более полно использует энергетический потенциал твердых топлив.

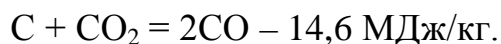
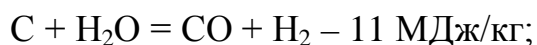
Пиролиз – это процесс, при котором органическое сырье подвергают нагреву при недостаточном поступлении кислорода или без его доступа для получения производных топлив (твердых, жидких и газо-

образных). Изначальным сырьем могут служить древесина, уголь, сланец, отходы сельскохозяйственной деятельности, бытовой мусор. Продуктами пиролиза являются газы, жидкий конденсат в виде смол и масел, твердые остатки в виде угля и золы.

Газификация – это пиролиз, проведенный с целью максимального получения производного газообразного топлива. Устройства для частичного сжигания биомассы, проектируемые на получение максимального выхода горючих газов, называются газогенераторами.

Для осуществления процесса газификации древесины необходимо поддерживать равновесную температуру порядка 900°C, а для получения угля в результате пиролиза – температуру 600–700°C.

При температуре выше 900°C происходит газификация угля совместно водяным паром и углекислым газом:



Преимущества газификации биомассы:

1. При сжигании биотоплива с высоким содержанием влаги невозможно получить высокие температуры, тогда как при сжигании газа, полученного из этого же топлива, такие температуры достижимы. Из газа можно удалить содержащуюся в нем влагу, которая является балластом, и газ нетрудно подогреть перед сжиганием.

2. При сжигании газа требуется меньшее количество избыточного воздуха ( $\alpha = 1,02\text{--}1,05$ ), чем для кускового топлива ( $\alpha = 1,2\text{--}1,3$ ), благодаря чему увеличивается температура горения и, как следствие, повышается эффективность изъятия энергии, содержащейся в топливе.

3. Легче автоматизировать процессы сжигания топлива.

4. В процессе пиролиза при температуре ниже 1000°C не осуществляется плавление золы, а следовательно, не происходит шлакование газогенератора.

Перечисленные качества способствовали широкому применению генераторного газа при получении тепловой энергии в 20–60 годах XX столетия – до начала масштабной разработки месторождений нефти и природного газа. Определенную проблему для производства электроэнергии с использованием газификации представляла и представляет низкая теплотворная способность генераторного газа по сравнению с жидкими топливами и природным газом. Эта проблема требует применения особого оборудования – газовых двигателей и турбин, специально сконструированных или переделанных для работы

на низкокалорийном топливе. Схема установки для осуществления пиролиза приведена на рис. 3.5.

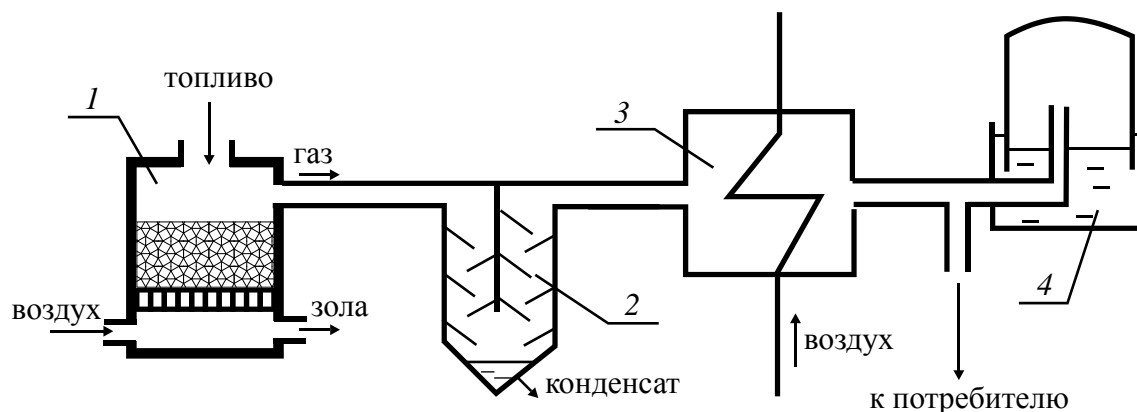


Рис. 3.5. Установка для осуществления пиролиза

Топливо поступает в газогенератор 1, выработанный газ поступает в конденсатоотводчик 2, где от газа отделяется влага. Затем газ поступает в теплообменник 3, где утилизируется остаточное тепло газа для собственных нужд установки (например, для предварительной сушки топлива). Охлажденный газ поступает либо потребителю, либо в емкость для хранения газа под давлением – газгольдер. Наиболее предпочтительными считаются вертикальные устройства, загружаемые сверху.

### 3.3.2. Слоевая газификация биомассы

Существуют различные схемы газогенераторных процессов. К более простым относятся слоевые. Слоевая газификация может происходить при встречной подаче воздуха и топлива – прямой процесс (рис. 3.6, а), попутной подаче топлива и воздуха сверху – обращенный процесс (рис. 3.6, б).

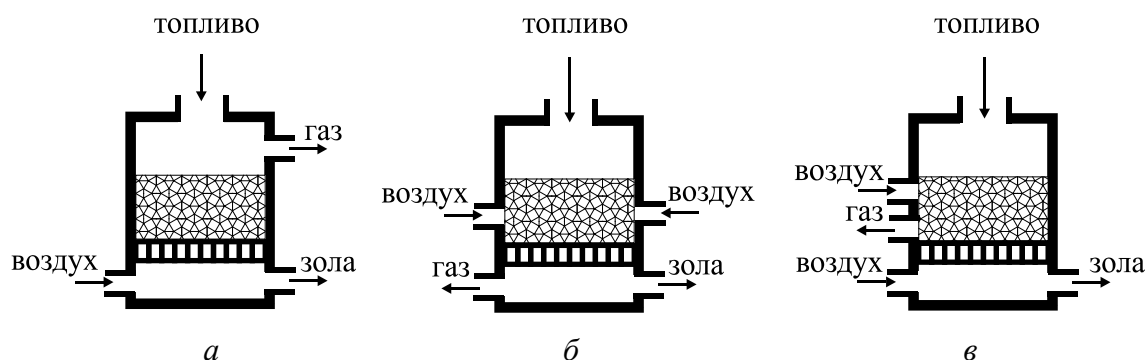


Рис. 3.6. Слоевые схемы процессов газификации: прямой (а), обращенный (б), смешанный (в)

В прямом процессе воздух подается в нижнюю часть газогенератора, где достигаются максимальная температура горения и наилучшие условия для полного выгорания углерода топлива, что снижает недожог до 1–2% от исходного количества углерода. Топочные газы проходят слой топлива снизу вверх, охлаждаются и обогащаются летучими смолистыми фракциями и водой. Наличие водяных паров в генераторном газе приводит к снижению его теплоты сгорания. При остывании генераторного газа, обогащенного смолистыми фракциями, происходит забивка газовых магистралей.

В обращенной схеме газификации зона сухой перегонки и сушки располагается выше зоны горения так же, как и в прямом процессе, но летучие, смолистые фракции и влага проходят эту зону, и на выходном ее участке смолистые фракции сгорают, что обеспечивает наилучшие условия для реакций восстановления. При обращенном процессе количество смолистых веществ и влаги в вырабатываемом газогенераторном газе минимально. Однако газогенераторы такого типа требуют более точной регулировки параметров и менее устойчивы в работе, чем аппараты прямого процесса. В них наблюдается значительный недожог топлива, для уменьшения которого обычно организуют вторичное дутье в нижнюю часть активной зоны генератора.

Промежуточной схемой между прямым и обратным процессами газификации можно считать двухзонную схему – поперечный процесс (рис. 3.6, в), разработанную для газификации многозольных топлив. Приведенные выше слоевые схемы являются наиболее простыми по своей технической реализации. Они находят применение в автономных системах теплоснабжения, в технологических установках и на электростанциях малой мощности.

Все названные схемы могут применяться для сжигания одноразовой закладки топлива, вторая и третья – для непрерывного сжигания топлива, когда его добавка не влияет существенно на процесс горения. Общим для всех схем является то, что при изменении мощности горения за счет уменьшения подачи воздуха не пропорционально падает КПД энергоустановки, т. е. ограничены возможности регулирования ее теплопроизводительности без снижения КПД. Кроме того, для реакции горения требуется больше избыточного воздуха в 1,6–2,4 раза по сравнению с теоретически необходимым количеством. Через топливник проходит большое количество балластных газов. Это азот, некоторое количество кислорода, не принявшего участия в горении, водяные пары от выпаривания воды, содержащейся в топливе. Все эти



газы участия в горении не принимают, а только нагреваются за счет теплоты сгорания углерода и водорода.

В качестве топлива для газогенераторов может применяться древесная щепа, кусковой торф (объем кусков от 1 см<sup>3</sup> до 200 см<sup>3</sup>), смесь кускового торфа с опилками или стружками. Топливом может быть только опилки и стружка, но при этом мощность может снижаться на 20–40% из-за зависания топлива в бункере и неравномерности процесса газообразования. Хорошим топливом для газогенераторов являются отходы гидролизной переработки – лигнин. При этом газогенераторы не требовательны. Они могут работать на измельченной древесине любых пород и любого качества с влажностью до 50%.

Чтобы процесс пиролиза шел успешно, должны соблюдаться определенные условия. Подаваемый материал предварительно сортируют для снижения негорючих примесей, подсушивают и измельчают. Критическим параметром, влияющим на температуру и на соотношение видов получаемых продуктов, является соотношение воздух – горючее (обычно воздуха подают около 30% от необходимого для полного сжигания топлива).

Проще всего управлять блоком, работающим при температуре ниже 600°C. При этом можно выделить четыре стадии газификации топлива:

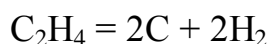
1) 100–120°C – подаваемый в газогенератор материал, опускаясь вниз, освобождается от влаги;

2) 275°C – отходящие газы состоят в основном из N<sub>2</sub>, CO и CO<sub>2</sub>; извлекаются уксусная кислота и метанол CH<sub>3</sub>OH;

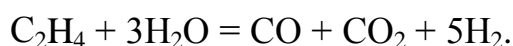
3) 280–350°C – начинаются экзотермические реакции, в процессе которых выделяется сложная смесь летучих химических веществ (кетоны, альдегиды, фенолы, эфиры);

4) свыше 350°C – выделяются все типы летучих соединений, происходит образование CO и увеличение образования H<sub>2</sub>, часть углерода сохраняется в форме древесного угля, смешанного с зольными остатками.

Горючие продукты подвергаются термическому разложению (пиролизу):



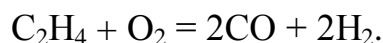
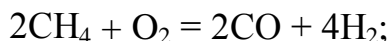
и конверсии:



Эти реакции происходят с поглощением тепла. Также с поглощением тепла идут и вторичные реакции:



Для поддержания теплового баланса, обеспечения рабочей температуры и ускорения приведенных выше реакций в газогенератор подается кислород:



Разновидности топлива, получаемого в результате пиролиза (пары, газы и твердый, богатый углеродом кокс (древесный уголь)), обладают меньшей по сравнению с исходной биомассой суммарной энергией сгорания, но отличаются большей универсальностью применения.

КПД пиролиза определяется как отношение теплоты сгорания произведенного топлива к теплоте сгорания, используемой в процессе биомассы. Достижимый КПД весьма высок – 80–90%.

Продукты пиролиза имеют следующие характеристики.

**Твердый остаток** (максимальная массовая доля 25–35%). Древесный уголь на 75–85% состоит из углерода, обладает теплотой сгорания около 30 МДж/кг.

**Жидкости** (конденсированные испарения, максимальная массовая доля около 30%). Делятся на вязкие фенольные смолы и текучие жидкости, пиролигенные кислоты (в основном уксусную) метанол (максимум 2%) и ацетон. Смола – это смесь различных сложных веществ (углерод, водород, кислород и др.). Смола способна гореть с выделением большого количества тепла, а при нагревании она испаряется, образуя газообразный продукт – пары смолы. Жидкости могут быть отсепарированы и использованы в химической промышленности либо могут использоваться вместе в качестве необработанного топлива с теплотой сгорания около 22 МДж/кг.

**Газы** (максимальная массовая доля, получаемая в газогенераторах, составляет примерно 80%). Смесь выделяющихся при пиролизе газов с азотом известна как древесный газ, синтетический или генераторный газ. Газ в основном состоит из  $\text{N}_2$  (45–60%),  $\text{H}_2$  (10–17%) и  $\text{CO}$  (14–30%) с малыми добавками  $\text{CH}_4$  (1–4%) и  $\text{CO}_2$  (6–12%), паров смолы, уксусной (древесной) кислоты ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), паров воды и пр. Среди этих газов двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ), продукт полного сгорания углерода, не способный к дальнейшему горению и поэтому являющийся

вредной примесью в газе пиролиза. Азот ( $N_2$ ), простое газообразное вещество, не способно сгорать и поэтому является балластом. Наибольшее количество газов дают древесина и торф. Теплота сгорания пиролизного газа составляет 5–10 МДж/кг (4–8 МДж/м<sup>3</sup>). Эти газы могут быть использованы непосредственно в дизельных или карбюраторных двигателях, при этом основная трудность – избежать попадания в цилиндры золы и конденсирующихся продуктов пиролиза.

Основным фактором, который определяет результаты термического разложения топлива, является температура. С ее увеличением возрастает выход горючего газа. В этом случае одновременно с уменьшением выхода полукокса снижается выход смолы и пирогенетической воды. При постоянной температуре повышение давления в газогенераторе увеличивает время пребывания газов в аппаратуре, что способствует интенсификации вторичных реакций в парогазовой фазе и увеличивает коэффициент перехода теплоты топлива в газ.

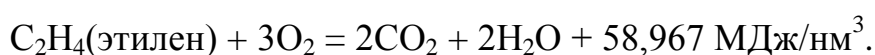
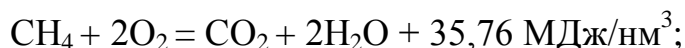
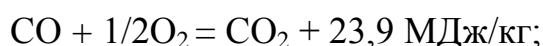
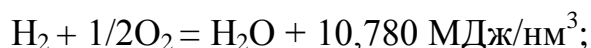
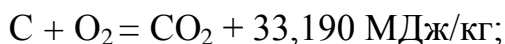
В табл. 3.7 представлен примерный состав газов при газификации воздухом для различных видов исходного сырья. Генераторный газ можно накапливать в газгольдерах при давлении, близком к атмосферному.

Таблица 3.7

**Состав газов при газификации воздухом  
для различных видов исходного сырья, об. %**

Исходное сырье	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Древесная щепа	28,1	15,4	6,8	0,5	46,3
Солома	15,4	14,8	13,2	0,2	53,0
Бурый уголь	25,5	14,0	6,2	0,2	51,7
Сланцы	18,2	12,1	7,7	0,3	61,7
Торф	25,1	14,0	6,2	0,2	52,1

Полученные в результате пиролиза пары смолы, уксусную кислоту, газы и кокс можно сжигать. Процессы горения могут быть выражены с помощью химических уравнений, показывающих, в каких соотношениях и как взаимодействуют отдельные вещества.



### 3.3.3. Газификация в кипящем слое

Наряду с описанными выше схемами слоевой газификации твердого топлива все шире используется процесс газификации в кипящем слое (рис. 3.7). Принцип его заключается в том, что при определенной скорости воздуха, подаваемого под слой топлива с заданным размером частиц, лежащего на решетке, этот слой приходит в движение, напоминающее кипение жидкости.

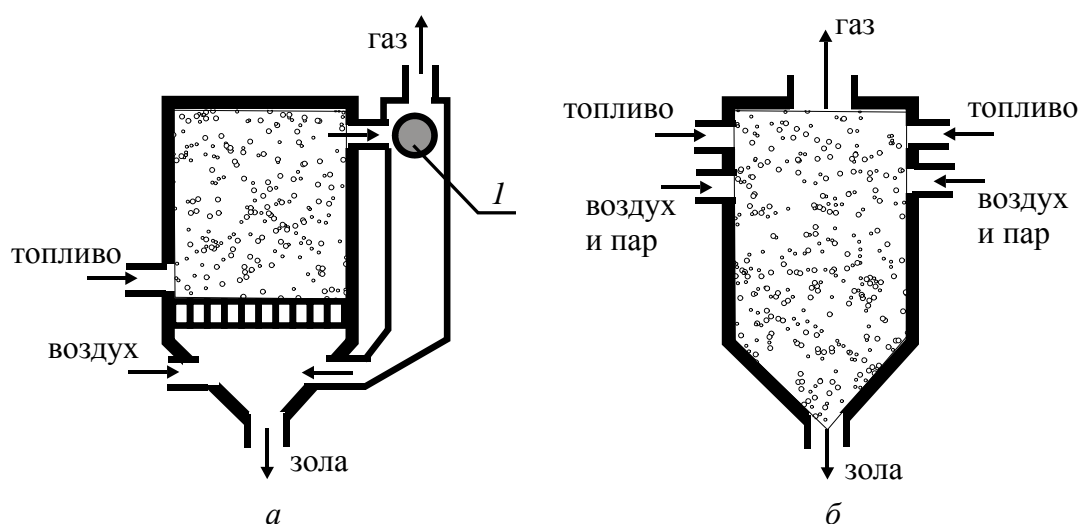


Рис. 3.7. Процесс газификации в кипящем слое:  
а – с циркуляцией: 1 – центробежный сепаратор (циклон);  
б – в потоке теплоносителя;

Схема газогенераторной установки с циркулирующим кипящим слоем показана на рис. 3.7, а. Частицы топлива в газификаторе находятся во взвешенном состоянии, витая в восходящем потоке газа. Это происходит, если сила лобового давления газа на частицу равна силе ее тяжести. Вследствие интенсивного перемешивания частиц топлива с раскаленным углем и воздухом в газогенераторе данного типа нет деления на зоны, присущего слоевым газогенераторам. Во всем объеме топлива поддерживается одинаковая температура, равная 900–1000°C. При газификации в кипящем слое протекают практически те же химические реакции, что и при газификации в неподвижном слое, но со значительно большей интенсивностью.

Еще одна перспективная схема газификации – газификация пылевидного топлива в потоке теплоносителя (например, пара) (рис. 3.7, б). Данный метод позволяет сочетать высокую интенсивность процесса с широкими пределами регулирования производительности газифика-

тора. Высокая интенсивность обусловлена увеличением реакционной поверхности, применением высоких температур и гидродинамических факторов. В этом процессе в качестве теплоносителя могут использоваться практически любые виды твердых тел, а также жидкие продукты и суспензии. К недостаткам данного способа можно отнести: неполное выгорание пыли и высокое содержание летучей золы в генерируемом газе, дороговизну подготовки твердого топлива, трудности с размещением подающего устройства (распылителя) для биомассы внутри реактора. Тем не менее данный метод считается передовым направлением в газификации биомассы.

Перспективность внедрения электростанций и теплофикационных установок на базе газогенераторов, работающих на местном топливе, заставляет активно заниматься созданием собственных газогенераторных установок в Беларуси. Широкое распространение в республике получили газогенераторы типа Пинча, которые перерабатывают в газ мелкозернистое твердое топливо в тонком слое. Характерной особенностью генераторов Пинча является то, что полученный горючий газ не охлаждается, а поступает в жаровую трубу, сохраняя при этом физическое тепло и образуя факел горения с температурой 1000–1300°C, который контактирует с котлом или воздушным теплообменником, что позволяет проводить процесс с минимальной потерей тепла.

Общий суммарный коэффициент избытка воздуха составляет 1,4–1,6, КПД газогенератора без котла 90–93%. Недостатками указанных установок являются высокие требования к качественным показателям твердого топлива. Газогенераторы данного типа устойчиво работают только на сухом топливе (влажностью не более 35%), размер частиц – до 70 мм. При использовании в качестве топлива древесных отходов (опилки, стружки и др.) часто происходит нарушение технологического процесса вследствие зависания топлива.

### **3.3.4. Уравнение теплового баланса газификации топлива**

Для случая горения с недостатком воздуха ( $\alpha < 1$ ) расчет температур значительно усложняется, так как выделяющаяся при горении теплота расходуется не только на нагрев дымовых газов, образующихся при горении части топлива, но и на различные процессы, сопутствующие термохимическому разложению оставшейся от горения части древесного топлива.

$$Q_T = Q_{д.г} + Q_n + Q_{\text{пиролиз}} + Q_{\text{газ}} + Q_{\text{хим}},$$

где  $Q_t$  – мощность тепловыделения при сгорании части подаваемого в аппарат топлива;  $Q_{д.г}$  – теплота, идущая на нагревание дымовых газов;  $Q_n$  – теплота, идущая на нагревание несгоревшей части топлива, сушку этого топлива до нулевой влажности, нагревание абсолютно сухой древесины до температуры его термического разложения ( $200^\circ\text{C}$ ) и нагревание образующегося водяного пара до температуры газификации угольного остатка;  $Q_{\text{пиролиз}}$  – теплота, идущая на нагревание летучих и полукокса (твердого остатка) при термическом разложении абсолютно сухой древесины до температуры газификации;  $Q_{\text{газ}}$  – теплота, идущая на нагревание генераторных газов, образующихся при газификации угольного остатка;  $Q_{\text{хим}}$  – теплота химических реакций термического разложения абсолютно сухой древесины и газификации угольного остатка.

При температуре газификации древесного топлива  $t = 900^\circ\text{C}$  минимально необходимое значение коэффициента недостатка воздуха определяется по формуле

$$\alpha_{\text{газ}} \geq 0,196 \frac{1 + 0,84\varphi}{1 - 0,92\varphi}.$$

Если задачей термохимической переработки древесины является получение древесного угля, то процесс эндотермической газификации угольного остатка должен быть исключен, т. е. доля сжигаемой части топлива должна быть меньше рассчитанной по формуле.

Тогда коэффициент недостатка воздуха определяется по формуле

$$\alpha_{\text{уг}} \leq 0,12 \frac{1 + 2,1\varphi}{1 - 0,94\varphi}.$$

Предельные (минимальные и максимальные) значения коэффициента недостатка воздуха в зависимости от влажности исходного топлива приведены на рис. 3.8. Разность  $\Delta\alpha = (\alpha_{\text{газ}} - \alpha_{\text{уг}})$  характеризует количество древесины, которое необходимо дополнительно сжигать для осуществления газификации угольного остатка. Подавать воздух в количестве, существенно большем рассчитанного ( $\alpha > \alpha_{\text{газ}}$ ), нецелесообразно, так как при этом будет изменяться состав газа и уменьшаться его теплота сгорания.

При  $\alpha = \alpha_{\text{уг}}$  осуществляется минимальный выход древесного угля, равный 15% от величины несгоревшей части абсолютно сухой древесины. При этом в состав такого угля будет входить только чистый углерод. При  $\alpha < \alpha_{\text{уг}}$  масса угля будет больше 15%, однако в состав угля будут входить и неразложившиеся смолистые соединения.

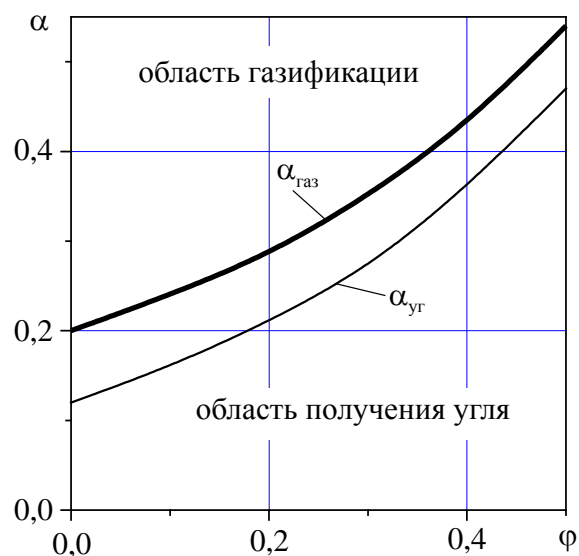


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента недостатка воздуха от влажности исходного топлива

Состав и теплота сгорания газовых продуктов газификации древесного топлива зависит, главным образом, от температуры газификации и исходной влажности топлива (рис. 3.9).

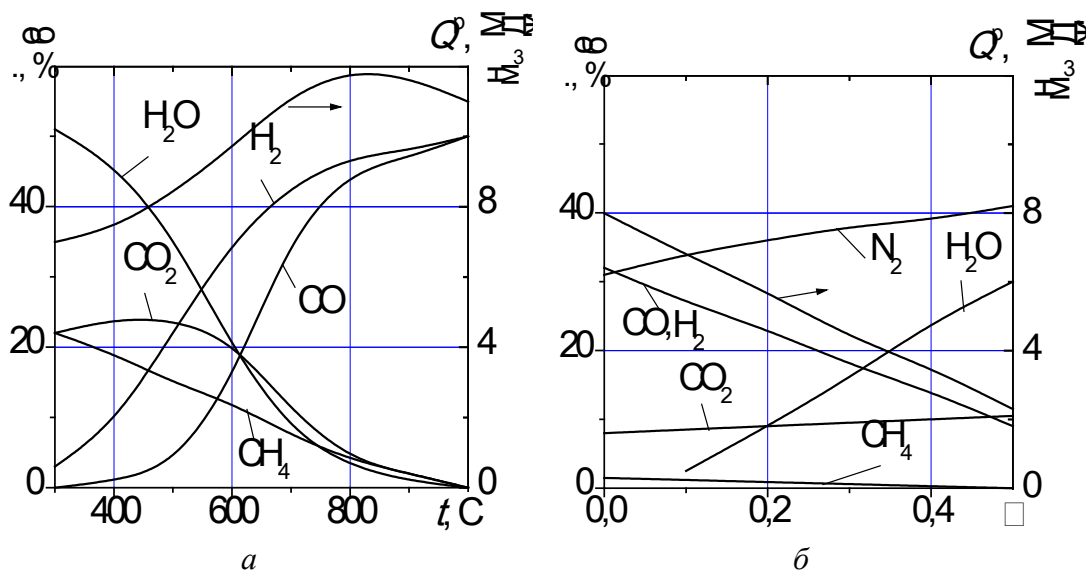


Рис. 3.9. Зависимости составляющих и теплоты сгорания газовых продуктов газификации древесного топлива от температуры газификации (а) и исходной влажности топлива (б)

### 3.3.5. Газификация под давлением

Повышению эффективности процесса газификации могут способствовать технологии, основанные на применении парогазовых устано-

вок с внутрицикловой газификацией в кипящем слое под давлением. Применение высоких давлений при газификации топлива позволяет увеличить плотность парогазовой смеси, уменьшить скорость газового потока при одном и том же массовом расходе, увеличить время контакта газов с перерабатываемым топливом. Это ведет к снижению габаритов газогенератора и капитальных вложений, позволяет снизить расход электроэнергии на собственные нужды.

С повышением давления в аппарате с кипящим слоем от  $p_0$  до  $p$  линейная скорость газового потока  $W_i^p$ , необходимая для организации кипящего слоя, с той же степенью расширения будет уменьшаться обратно пропорционально корню квадратному из отношения давлений

$$v_j^p = v_j^{p_0} \sqrt{p / p_0},$$

где  $v_j^{p_0}$  – скорость газового потока, соответствующая устойчивому состоянию кипящего слоя в расчете на крупные частицы, не уносимые из аппарата при давлении, близком к атмосферному.

С повышением давления в аппарате средний диаметр мелких частиц, уносимых из аппарата, должен уменьшаться обратно пропорционально корню четвертой степени из отношения давлений

$$d_p = \frac{d_0}{\sqrt[4]{p / p_0}},$$

где  $d_0$  – предельный диаметр мелкой частицы, уносимой из верхней зоны кипящего слоя.

Повышение давления в газогенераторе с кипящим слоем увеличивает интенсивность процесса газификации пропорционально корню квадратному из отношения давления

$$q_T^p = q_T^{p_0} \sqrt{p / p_0},$$

где  $q_T^p$  – интенсивность процесса газификации при повышенном давлении, кг/(м<sup>2</sup>·ч);  $q_T^{p_0}$  – то же при давлении, близком к атмосферному, кг/(м<sup>2</sup>·ч).

Кроме того, при газификации одного и того же вида топлива в зависимости от способа его проведения, состава применяемого дутья, параметров технологического режима, а также конструкции газогенератора можно получить газ различной теплотворной способности. Так, при парокислородной газификации топлива под давлением получаемый газ содержит повышенное количество метана. С ростом давления увеличивается количество связанного водорода в газе и превы-



шает количество водорода, первоначально содержащегося в топливе, образующегося за счет разложения водяного пара.

Оптимальный состав дутья, при котором обеспечивается необходимый температурный режим, предотвращающий шлакование, подбирается опытным путем. Так, в процессе газификации бурого угля оптимальный состав паровоздушного дутья составляет  $\text{H}_2\text{O}/(\text{O}_2 + \text{N}_2) = 0,16\text{--}0,18 \text{ кг/м}^3$  (норм.), а парокислородного –  $\text{H}_2\text{O}/(\text{O}_2) = 4,3\text{--}4,5 \text{ кг/м}^3$  (норм.). После очистки газа от  $\text{CO}_2$  теплота сгорания может составлять до 15,5–16 МДж/кг.

Процесс термического разложения сланцев зависит как от скорости собственно химического превращения, так и от условий тепло- и массообмена между газом и зернистой средой (топливом).

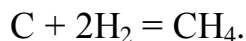
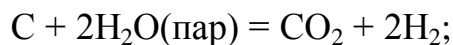
В результате увеличения давления в газогенераторе с кипящим слоем удастся сократить время прогрева частицы до температуры реакции и увеличить скорость химических реакций:

$$\tau_p \approx p^m \exp(-E/RT),$$

где  $\tau_p$  – время реакции;  $p$  – давление;  $E$  – энергия активизации молекул вещества;  $T$  – температура.

С ростом давления в кипящем слое для реакций с неизменным порядком выше нуля, протекающих в области кинетического режима, скорость реагирования дополнительно увеличивается за счет повышения массовой концентрации реагентов.

При газификации под давлением около 85% водорода, получаемого в результате разложения водяного пара, переходит в газ в виде свободного водорода и только 15% водорода взаимодействует с продуктами термического разложения и газификации топлива, в то время как в процессе газификации при нормальном давлении в свободный водород газа переходит не только весь водород разложившегося водяного пара, но и водород органической массы топлива.



### 3.3.6. Газификация биотоплива

#### твердым высокотемпературным теплоносителем

В 1970–1990 годах Энергетическим научно-исследовательским институтом им. Г. М. Крижановского была создана и освоена в промышленном масштабе пиролизическая технология переработки горючих сланцев, позволившая рассматривать сланцы с  $Q_H \geq 3,8 \text{ МДж/кг}$

как вполне приемлемый источник топлива для тепловых электростанций, причем КПД таких станций может превышать КПД ТЭС, работающих на качественных углях при тех же параметрах пара. Технология реализуется при близком к атмосферному давлении (максимальное избыточное давление в аппаратах 0,025–0,030 МПа).

Суть технологии состоит в том, что сырой сланец предварительно проходит грохочение и дробление в дробилке, после чего подается в сушилку для сушки горячим паром из котла-утилизатора (рис. 3.10). Раздробленный до определенного размера и высушенный сланец смешивается с высокотемпературным (800–850°C) теплоносителем, которым является собственная зола сланца, и подается во вращающийся реактор пиролиза. Здесь сланец нагревается при отсутствии кислорода до температуры 460–490°C и из него выделяется парогазовая смесь, содержащая пары углеводородов, неконденсирующиеся газы ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  и др.) и коксозольный остаток.

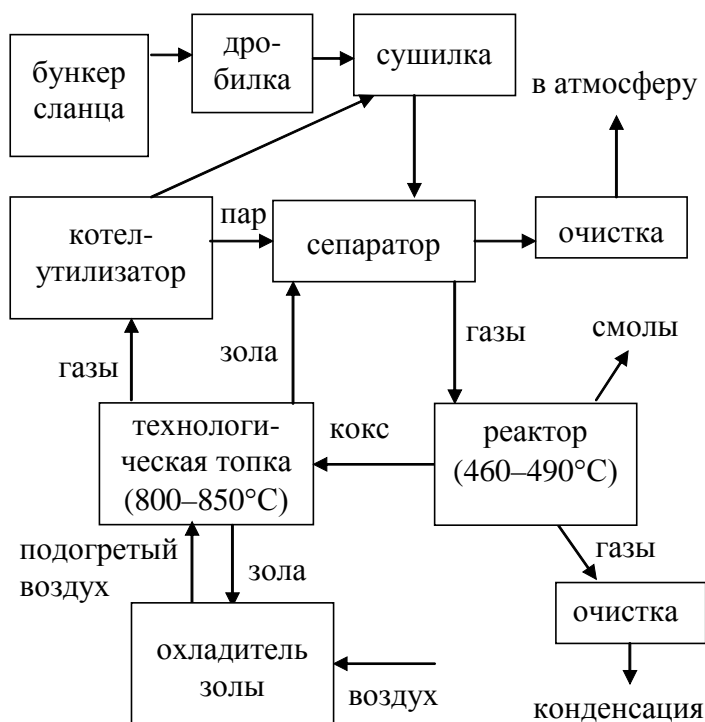


Рис. 3.10. Технологическая схема установки термического разложения сланца

Парогазовые продукты термического разложения горючего сланца проходят через очистку от пыли в пылевой камере и отводятся в конденсационное устройство, где пары углеводородов конденсируются, образуя сланцевую смолу. Дизельная фракция сланцевой

смола пригодна для использования в качестве газотурбинного топлива, а остальная ее часть – в качестве котельного топлива. Неконденсирующийся полукоксовый газ пригоден в качестве газотурбинного либо котельного топлива. Коксовый остаток отводится из реактора пиролиза в аэрофонтанную топку, где его органические составляющие дожигаются в потоке воздуха. Выделившееся при этом тепло используется для нагрева золы-теплоносителя и для производства пара в котле-утилизаторе. Пар расходуется на собственные технологические и другие нужды. Важным этапом переработки сланцев является утилизация тепла отбираемой из топки золы, что позволяет повысить КПД процесса на 8–10%.

Эффективность переработки сланцев определяется степенью извлечения из горячего сланца химически связанного тепла в органическом веществе. Важными показателями этой технологии являются доли потенциального тепла топлива:  $q_{\text{пгс}}$  – переходящая в парогазовую смесь и  $q_{\text{кзо}}$  – остающаяся в коксозольном остатке. Чем больше  $q_{\text{пгс}}$ , тем больше высококалорийного топлива (смола+газ) можно получить из сланца:

$$q_{\text{пгс}} = 100\% - q_{\text{кзо}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{пр}}}{\sum Q_{\text{с}}},$$

где  $\sum_{i=1}^n Q_{\text{пр}}$  – теплота сгорания продуктов разложения (парогазовой смеси);  $n$  – число продуктов;  $\sum Q_{\text{с}}$  – суммарная теплота сгорания горючего сланца.

Например, для белорусских сланцев  $q_{\text{пгс}} = 70\%$ , т. е. в парогазовую смесь переходит почти 70% потенциального тепла сланцев при наиболее благоприятной температуре пиролиза  $t = 460\text{--}480^\circ\text{C}$ .

Для введения процесса термического разложения горючего сланца требуется дополнительная энергия (электрическая, механическая и др.). Кроме того, в установке избыточное тепло процесса используется для получения пара для собственных нужд в котле-утилизаторе. Тогда степень эффективности извлечения органического вещества из горючего сланца необходимо определять по энергетическому коэффициенту использования

$$\eta_{\text{э}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{пр}} + \sum Q_{\text{э.п}}}{\sum Q_{\text{с}} + \sum Q_{\text{э.п}}},$$

где  $\sum Q_{\Sigma, \text{п}}$  – общая теплота дополнительных энергетических продуктов (пара, воды, воздуха и т. д.),  $\sum Q_{\Sigma, \text{р}}$  – энергия, потребляемая для термического разложения сланца.

Энергетический коэффициент использования составляет  $\eta_{\Sigma} = 56\text{--}84\%$ .

Способность горючих сланцев при термическом нагреве выделять летучие вещества, представляющие смесь сложных кислородных соединений и углеводородов, обусловила использование этого полезного ископаемого для технологической переработки с целью получения ряда ценных продуктов:

1) горючих – автобензина, моторного керосина, дизельного топлива, топочного мазута, высококалорийного газа, топочного масла;

2) химических – шпалопропиточного масла, двухатомных фенолов, клеевых смол (фенолформальдегидных, эпоксидных, фенолоспиртовых), электродного кокса, кукурсоль-лака, моющего средства типол и др.

Из газового бензина также можно получать бензол, толуол, сольвенты.

Энергетическим институтом им. Г. М. Крижановского были проведены исследования технологической переработки белорусских сланцев. Получен следующий массовый выход продуктов термического разложения (температура в реакторе  $480^{\circ}\text{C}$ ): смола –  $7,4\%$  (теплота сгорания  $41,5$  МДж/кг), газовый бензин –  $0,2\%$  ( $44,6$  МДж/кг), полукоксовый газ  $3,3\%$  ( $35,3$  МДж/кг), вода пирогенетическая –  $2,8\%$ , полукокс –  $86,3\%$ .

Вышеназванным институтом были проведены исследования технологической переработки торфа с влажностью  $45\%$ . Получен следующий массовый выход продуктов термического разложения (температура в реакторе  $500\text{--}850^{\circ}\text{C}$ ): смола –  $2,5\text{--}12\%$  (теплота сгорания  $36,4$  МДж/кг), газовый бензин –  $3\text{--}4\%$  ( $44,6$  МДж/кг), полукоксовый газ  $3,3\%$  ( $16,8\text{--}23$  МДж/кг), вода пирогенетическая –  $2,8\%$ , полукокс –  $86,3\%$  ( $29,8\text{--}34$  МДж/кг).

Использование в котлоагрегатах котельного масла и газа вместо горючего сланца значительно уменьшает загрязнение воздушного бассейна по двум причинам.

1. При термическом разложении горючего сланца в атмосферу выбрасывается в  $5\text{--}6$  раз меньше газов, чем при сжигании натурального сланца.

2. В дымовых газах технологической топки сернистый газ практически отсутствует. Объясняется это активным соединением окислов

серы с известью при температуре 800°C. Таким образом, сера концентрируется в золе до 90%, а в смоле и газе – менее 10%.

### 3.3.7. Утилизация золы

Как уже упоминалось раньше, содержание золы в древесном топливе 1%, в соломе – 3–5%, в торфе – 4–6%, в сланцах – 61–82%. Для организации эффективного производства получения тепловой энергии необходимо решить вопрос с утилизацией золы.

Древесная зола и зола соломы содержат необходимые для растений питательные вещества (калий, магний, фосфор). Следовательно, зола древесины и соломы могут применяться в качестве удобрений. Однако следует учитывать, что в золе могут накапливаться тяжелые металлы, и поэтому использовать это удобрение нужно в разумных пределах. При этом целесообразнее древесную золу возвращать на лесные вырубki, а золу соломы – на пашни.

Зола торфа по своему составу не пригодна в качестве удобрения. Эту золу можно использовать в дорожном строительстве в качестве основы для дороги.

Положительным эффектом сжигания сланцев может стать утилизация зольного остатка. Химический состав золы белорусских горючих сланцев:  $\text{SiO}_2 = 20,0\text{--}53,2\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,1\text{--}11,7\%$ ,  $\text{TiO}_2 = 0,30\text{--}0,93\%$ ,  $\text{CaO} = 7,5\text{--}45,0\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,1\text{--}17,6\%$ ,  $\text{MgO} = 1,7\text{--}7,2\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 1,1\text{--}6,3\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 0,15\text{--}0,63\%$ .

Теоретические предпосылки и практический опыт применения пылевидных сланцевых зол позволяют выявить следующие пути рационального их использования в строительной практике и других отраслях народного хозяйства:

- изготовление строительных автоклавных материалов (крупная фракция);
- производство высокомарочного сланцезольного портландцемента (мелкая фракция);
- производство низкомарочных вяжущих материалов (мелкая фракция);
- укрепление оснований под дороги;
- известкование кислых почв.

При этом экономичность энергетического использования горючих сланцев при применении соответствующей технологии их переработки значительно повышается.

В Беларуси работает три цементных завода: Белорусский цементный завод (г. Костюковичи, Могилевская область), ОАО «Красно-

сельскостройматериалы» (г. п. Красносельский, Гродненская область), ПРУП «Кричевцементношифер» (г. Кричев, Могилевская область). Химический состав портландцемента с минеральными добавками марки 500 ПЦ500-Д20 ПРУП «Кричевцементношифер»:  $\text{SiO}_2 = 20,65\text{--}22,50\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 5,54\text{--}6,10\%$ ,  $\text{CaO} = 56,45\text{--}62,95\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,10\text{--}4,92\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 0,65\text{--}0,73\%$ ,  $\text{SO}_3 = 1,5\text{--}3,5\%$ ,  $\text{MgO} = 0,82\text{--}1,64\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 0,20\text{--}0,32\%$ . Основными сырьевыми компонентами цемента являются мел ( $\text{CaO}$ ), глина ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) и пиритные огарки ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Как видно из сравнения химических составов портландцемента и сланцевой золы (см. выше), последняя содержит необходимое для производства цемента количество  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Следовательно, сланцевая зола может полностью или частично заменить глину и пиритные огарки при производстве портландцемента, а также использоваться в качестве корректирующих добавок. Как показывают научные исследования и практический опыт, в состав цемента может добавляться до 30% сланцевой золы.

При общей производительности белорусских цементных заводов около 3 млн. т цемента в год, они могут потреблять около 1 млн. т сланцевой золы, что соответствует утилизации 1,2 млн. т сланцев или потреблению 0,246 млн. т у. т. в год (это сопоставимо с энергией, которую планируют получать в Республике Беларусь к 2010 году в областях солнечной энергетики и ветроэнергетики).

В действительности потенциал цементных заводов по утилизации сланцев в несколько раз выше, поскольку около любого завода имеется множество отработанных открытых сырьевых карьеров, где можно без больших экономических затрат и без дополнительного вреда для окружающей среды захоронить избыточную сланцевую золу.

Это соответствует 99 у. е. за 1 т у. т., или 120 у. е. за 1 тыс. м<sup>3</sup> природного газа. Следует отметить, что мировая цена на природный газ в 1,5–2 раза больше. Расчетное количество сланцевой золы (860 кг) достаточно для производства 2,6 т цемента. При этом полученная сланцевая парогазовая смесь позволит обеспечить 20% потребности в технологическом тепле (из расчета 220 кг у. т. на 1 т цемента).

Пылевидная сланцевая зола может применяться в качестве вяжущего материала для укрепления грунтов и покрытий. При смешивании грунта основания с золой в соотношении 5 : 1 по массе при толщине слоя 10–20 см, смачивании и укладке зологрунтовая смесь затвердевает, и после поверхностной обработки битумными материалами образуется устойчивая и непылящая дорога (расход золы составляет в среднем 450 т на 1 км).

Ввиду того, что сланцевые золы содержат значительное количество свободного  $\text{CaO}$ , а также некоторое количество полезных для растений калия и микроэлементов, их с успехом можно использовать для известкования кислых почв.

### **3.3.8. Целесообразность промышленного освоения горючих сланцев в Республике Беларусь**

Несмотря на все положительные стороны комплексного безотходного способа переработки, горючие сланцы не смогут заменить традиционные виды топлива (нефть и природный газ). Это связано, прежде всего, с ограниченной способностью промышленного и сельскохозяйственного комплекса республики полностью утилизировать сланцевую золу. В результате термической обработки горючих сланцев образуются продукты, которые могут быть использованы в энергетике, химической промышленности, производстве строительных материалов, дорожном строительстве и сельском хозяйстве. Эффективность использования их, в первую очередь, определяется уровнем потребности и затратами на производство.

Производство таких продуктов, как бензол, толуол, сольвент, а также фенолов, кетонов и кислот путем пиролиза газового бензина не должно вызывать больших сложностей, поскольку в стране имеются опытные специалисты и передовые технологии нефтеперерабатывающих заводов. Потребность этих химических элементов также не вызывает сомнения, однако вклад их в повышение рентабельности предприятия, скорее всего, будет незначителен из-за небольшого объема производства.

Сложность промышленного использования горючих сланцев во многом связана с решением экологической проблемы – утилизации зольных отходов, остающихся в больших количествах (более 70% сырья) в результате переработки сланцев. Однако при намеченной большой строительной программе в Республике Беларусь имеются значительные и возникнут еще большие потребности в вяжущих материалах. Использование сланцевой золы может осуществляться для производства материалов как для дорожного, так и промышленного строительства. При этом утилизация сланцевой золы в цементном производстве может осуществляться в крупных масштабах.

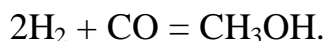
В области сельского хозяйства применение сланцевой золы для улучшения структуры торфяных почв также может быть сопряжено с большими объемами. В настоящее время в республике насчитывается 700 тыс. га торфяных почв, улучшение плодородия которых может обеспечено внесением в них более 1 млрд. т сланцевой золы.

Вопрос о возможности использования горючих сланцев рассматривался в СССР еще в середине XX столетия. Однако на тот период их использование было не эффективно из-за доступности более энергоемких ресурсов. В настоящее время при росте себестоимости традиционных видов топлива и новом уровне современных технологий комплексное промышленное освоение горючих сланцев может стать экономически оправданным.

### **3.3.9. Другие термохимические способы переработки биомассы**

Биомасса может сжигаться или подвергаться пиролизу непосредственно после предварительной сортировки и измельчения. Однако она может быть обработана химически для того, чтобы получить исходный материал для спиртовой ферментации или вторичное топливо. Рассмотрим несколько наиболее важных примеров из большого числа возможных.

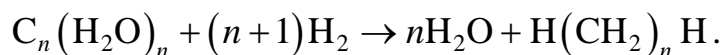
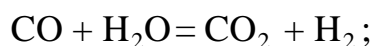
**Получение метилового спирта.** Метиловый спирт (метанол) – ядовитая жидкость, получаемая в процессе каталитической реакции между  $H_2$  и  $CO$  при температуре  $330^\circ C$  и давлении 15 МПа:



Водород  $H_2$  и угарный газ  $CO$  – компоненты синтетического газа, которые могут получаться при газификации биомассы. Метанол можно использовать в качестве заменителя бензина с теплотой сгорания 23 МДж/кг.

**Гидрогенизация.** Измельченную, разложившуюся или переравленную биомассу, например навоз, нагревают в атмосфере водорода до температуры около  $600^\circ C$  при давлении около 5 МПа. Получаемые при этом горючие газы, преимущественно метан  $CH_4$  и этан  $C_2H_6$ , при сжигании дают около 6 МДж на 1 кг сухого сырья.

**Гидрогенизация с применением  $CO$  и пара.** Ведется аналогично предыдущему процессу, но нагревание производится в атмосфере  $CO$  и водяного пара при температуре  $400^\circ C$  и давлении 5 МПа. Из продуктов реакции извлекаются газ и синтетическая нефть, которую можно использовать как топливо. Соответствующие реакции идут в присутствии катализатора:



Последняя реакция описывает превращение углеводов в нефтеподобные углеводороды. Эффективность преобразования энергии в этом процессе составляет примерно 65%.



### **3.4. Термическая переработка твердых бытовых и промышленных отходов**

#### **3.4.1. Недостатки термической переработки твердых бытовых отходов**

Все термические технологии обладают одним общим недостатком – повышенной экологической опасностью при бункерном хранении, связанной с гниением отходов, и с наличием вторичных отходов. Неудовлетворительная экологическая чистота связывается главным образом с отходами, содержащими хлорорганические вещества и выделяющие другие высокотоксичные органические соединения (фураны и диоксины). Выброс диоксинов происходит при протекании реакций с участием углерода, хлора и кислорода в присутствии катализаторов (Cu). Диоксинообразующими компонентами твердых бытовых и промышленных отходов являются такие материалы, как картон, газеты, пластмассы, изделия из поливинилхлорида и т. п.

В результате термической переработки органической части отходов образуются диоксид углерода, пары воды, оксиды азота и серы, аэрозоль, оксид углерода, бензопирен и диоксины. Зола, имеющая в своем составе соли тяжелых металлов, накапливается в нижней части печи и периодически вывозится на полигоны для захоронения или используется в производстве цемента.

При технологии сжигания твердых бытовых и промышленных отходов при температуре менее 900°C остается 25–30% вторичных твердых отходов, зараженных высокотоксичными веществами и требующих, в свою очередь, обезвреживания или специального захоронения. Кроме этого, при сжигании отходов при указанной температуре и медленном нагреве идет интенсивное образование диоксинов и полиароматических углеводородов как в процессе сжигания отходов, так и в процессе охлаждения газов, где главную функцию синтеза и их транспортировки выполняют аэрозоли сажи. В результате этого происходит загрязнение окружающей среды на расстоянии до 30 км и, как правило (из зарубежной практики), заводы по переработке твердых бытовых и промышленных отходов закрываются (Нидерланды, Голландия, Польша и т. д.) или переводятся на дорогостоящую систему очистки газов.

Основопологающей при переработке твердых бытовых и промышленных отходов является проблема образования диоксидов. Впервые о диоксинах заговорили в середине 50-х годов XX столетия в связи с таинственной болезнью «хлоракне», поражавшей работников

некоторых химических предприятий. Но после того, как американцы стали использовать во Вьетнаме так называемый «Agent Orange», не только уничтожавший растительность джунглей, но и поражавший людей и уродующий их потомство, на информацию о диоксинах был наложен гриф «Совершенно секретно».

Оказалось, что не меньшую опасность, чем боевые отравляющие вещества и «Agent Orange», представляют газообразные продукты сгорания твердых бытовых отходов, т. е., попросту говоря, обычного бытового мусора.

Диоксины относятся к группе ксенобиотиков, т. е. веществ, совершенно чужеродных для всего живого. В медико-биологическом плане диоксины опасны тем, что способны, подобно радиации, накапливаться в организме и приводить к повреждению печени, центральной нервной системы, снижению иммунной защиты и возникновению мутаций у потомства. Причем было установлено, что безопасных доз диоксинов вообще не существует: даже в исчезающе малых концентрациях они поражают все живые существа – от бактерий до теплокровных.

Одна лишь молекула любого из диоксинов способна нарушить деятельность клетки и вызвать затем цепь биохимических реакций, полностью нарушающих все функции организма. Так, диоксины влияют на рецепторы, ответственные за работу всех гормональных систем; с молоком матери они передаются младенцам, в результате чего те отстают в развитии, а впоследствии у них возникают заболевания, характерные только для стариков («синдром преждевременного старения»).

Одна из самых неприятных особенностей диоксинов заключается в том, что они чрезвычайно устойчивы и крайне неохотно разрушаются под действием обычных химических и биологических факторов и начинают разлагаться лишь при температуре выше 1200–1250°C.

Реально снижают содержание диоксинов в отходящих газах только угольные фильтры, на которых диоксины необратимо связываются, а также специальные каталитические дожигатели. Именно в силу трудностей нейтрализации диоксинов очистные сооружения современных заводов стоят очень дорого.

Однако опыт переработки твердых бытовых и промышленных отходов термическими методами позволил сделать вывод, что при сжигании отходов диоксины не образуются, если соблюдаются следующие условия:

- температура превышает 1250°C;
- процесс происходит в окислительной среде (при коэффициенте избытка воздуха более  $\alpha > 1,1$ );

– уничтожение отходов длится более двух секунд, причем температура практически мгновенно достигает рабочего значения.

### **3.4.2. Технологии термической утилизации отходов**

Существует большое количество агрегатов для термической переработки отходов, однако на данный момент эти конструкции имеют ряд существенных недостатков:

- образование соединений группы диоксинов и других опасных веществ;
- дороговизна эксплуатации агрегата, т. е. не обеспечивается экономическая выгода;
- большие выбросы в атмосферу;
- неполное выгорание отходов и т. д.

Методы термической утилизации отходов можно разделить на группы:

- слоевое сжигание;
- сжигание в кипящем слое;
- сжигание в кипящем расплаве;
- газификация.

***Слоевое сжигание отходов в котлоагрегатах.*** Метод слоевого сжигания исходных отходов наиболее распространен и изучен. При данном способе обезвреживания сжигаются все поступающие на завод отходы без какой-либо предварительной подготовки или обработки. Однако сжигание отходов происходит при сравнительно низких температурах – от 600 до 900°C. А именно при такой температуре наиболее интенсивно образуются ядовитые продукты, а то, что сгореть не может (силикаты, металлы), оказывается зараженным диоксинами. Поэтому все современные мусоросжигательные заводы оборудованы высокоэффективными устройствами для улавливания твердых и газообразных загрязняющих веществ, стоимость их достигает 30% капитальных затрат на строительство мусоросжигательного завода.

***Сжигание отходов в кипящем слое.*** Сжигание в кипящем слое осуществляют за счет создания двухфазной псевдогомогенной системы «твердое тело – газ» путем превращения слоя отходов в «псевдожидкость» под действием динамического напора входящего потока газа, достаточного для поддержания твердых частиц во взвешенном состоянии. Слой напоминает кипящую жидкость, и его поведение подчиняется законам гидростатики.

К основным достоинствам метода относят: интенсивное перемешивание твердой фазы, приводящее к полному выравниванию темпе-

ратур, концентраций и других параметров по объему псевдооживленного слоя; высокая удельная производительность слоя; отсутствие движущихся и вращающихся частей; сравнительно простое устройство реактора; обеспечивается наилучший режим теплопередачи.

Наиболее существенными недостатками данного метода являются неравномерность времени пребывания в слое обрабатываемых частиц твердой фазы; возможность слипания и спекания твердых частиц; необходимость установки мощных пылеулавливающих устройств на выходе дымовых газов из слоя; необходимость во многих случаях подогрева оживающего агента; ограниченность рабочих скоростей оживающего агента.

**Сжигание отходов в расплаве (печь Ванюкова).** Для термической переработки твердых бытовых отходов при температуре 1350–1400°C можно использовать металлургические печи Ванюкова.

Сущность технологического процесса переработки твердых бытовых отходов в печи Ванюкова заключается в высокотемпературном разложении (плавке) компонентов рабочей массы в слое, находящемся в ванне печи барботируемого шлакового расплава при температуре 1350–1400°C, и выдерживании их в течение 2–3 с. Сбрасываемые в ванну твердые бытовые отходы погружаются в интенсивно перемешиваемый вспененный расплав. При этом происходит полный разрыв связей в структурной цепочке сложных органических соединений, что предотвращает появление диоксинов и фуранов, имеющих техногенную природу образования.

Недостатком печи является потеря металлов в шлаке. Создание безинерционной системы автоматического регулирования процесса сложно, и, соответственно, сложно поддержание заданной температуры без дополнительного расхода энергии, тепловой КПД низок. Запуск печи достаточно сложен и занимает 7–8 суток.

**Газификация** – способ переработки в вихревых реакторах или печах при температурах 600–1100°C в атмосфере газифицирующего агента (воздух, кислород, водяной пар, диоксид углерода или их смесь). В результате реакции образуются синтез-газ ( $H_2$ , CO), туман из жидких смолистых веществ, бензопирена и диоксинов. Реакция газификации протекает в среде с восстановительными свойствами, поэтому оксиды азота и серы практически не образуются.

Сжигание твердых бытовых и промышленных отходов по технологии газификации сложнее технически как на стадии пиролиза и сжигания отходов, так и на стадии газоочистки.

Отличительная особенность газификации от сжигания состоит в том, что в реакторе газовая фаза имеет восстановительные свойства.

Поэтому образование оксидов азота и серы термодинамически невыгодно, и вредных газовых выбросов у газификаторов значительно меньше, чем у печей сжигания.

В результате процесса пиролиза из сырья образуются парогазовая смесь и твердый углеродистый остаток (пирокарбон).

Существуют требования к перерабатываемому материалу: крупность материала не более 200 мм (допускается крупность 250 мм для отдельных кусков бумаги и полимерной пленки) и его теплотворная способность не менее 7 МДж/кг. Все это приводит к внедрению в технологическую схему соответствующих операций, а значит, к дополнительным экономическим расходам.

### **3.5. Анаэробная переработка биотоплива**

Многие виды биомассы обладают достаточно высокой теплотворной способностью. Однако не всегда прямое сжигание биомассы целесообразно. Влажная биомасса требует специальной сушки для сжигания. При этом затраты на сушку могут быть выше, чем полученный эффект от сжигания биомассы. В связи с этим биомассу с достаточно высокой влажностью (более 60%) целесообразно подвергать анаэробному способу переработки. В результате этого не только исключается загрязнение окружающей среды и производится топливо (биогаз), но и получается высокоэффективные органические удобрения.

#### **3.5.1. Технология анаэробной переработки**

В естественных условиях разрушение любых видов биомассы, в том числе и навоза животных, происходит путем разложения на элементарные соединения под действием разлагающих организмов, грибов и бактерий. Для этого процесса предпочтительна сырость, тепло и отсутствие света.

На конечной стадии разложение может происходить под действием бактерий:

- 1) аэробных – в присутствии кислорода с получением углекислого газа  $\text{CO}_2$ ,
- 2) анаэробных – в отсутствие кислорода с получением смеси углекислого газа  $\text{CO}_2$  и метана  $\text{CH}_4$  (биогаз).

Биохимические процессы при анаэробном сбраживании протекают в три стадии, причем с различными типами анаэробных бактерий.

1. Расщепляются нерастворимые биологические материалы (например, целлюлоза, полисахариды, жиры) на низкомолекулярные ор-

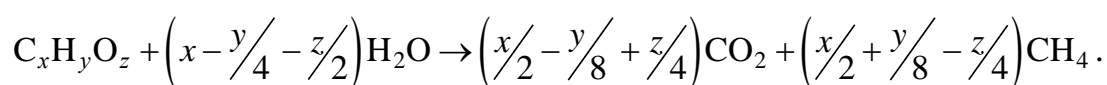
ганические соединения (аминокислоты, моносахариды, жирные кислоты). При температуре 25°C этот процесс длится около суток.

2. Кислотопродуцирующие бактерии образуют уксусную и пропионовую кислоты, спирт, углекислый газ, водород, сероводород, аммиак. При температуре 25°C этот процесс длится около суток.

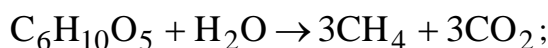
3. Анаэробные метанообразующие бактерии вырабатывают метан и углекислый газ. При температуре 25°C этот процесс длится около 14 суток.

Выход газа в единицу времени сначала резко увеличивается, а затем по достижении максимума постепенно уменьшается. Через 100 суток выход газа полностью прекращается.

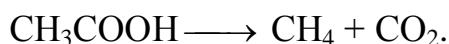
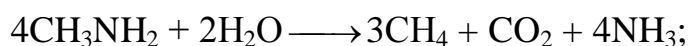
Основное уравнение, описывающее анаэробное сбраживание, имеет вид



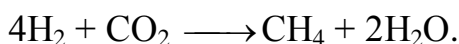
Некоторые виды бактерий образуют метан из целлюлозы и муравьиной кислоты:



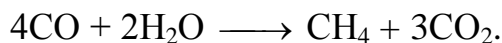
Известны метанообразующие бактерии, образующие метан из метанола, метиламина, диметиламина, триметиламина и (или) ацетата:



Кроме того, большинство известных видов метаногенов образуют метан из молекулярного водорода и углекислоты:



Ряд видов метаногенов синтезирует метан из окиси углерода:



В результате получается биогаз с составом: углекислый газ  $CO_2 = 27\text{--}45\%$ , метан  $CH_4 = 55\text{--}80\%$ , а также малые примеси водорода  $H_2 = 1,0\text{--}1,5\%$  и сероводорода  $H_2S = 0,2\text{--}0,5\%$  (при наличии сероводорода имеется характерный запах). Теплота сгорания биогаза составляет  $20\text{--}25 \text{ МДж/м}^3$ , или  $28\text{--}35 \text{ МДж/кг}$ . Выход газа составляет  $0,4\text{--}0,6 \text{ м}^3$  на 1 кг органической массы.

В настоящее время получили распространение две технологии производства биогаза с использованием:

1) небольших объемов (50–200 кг) органического сырья при высоких температурах 40–60°C в специальных устройствах – биогазогенераторах (метантенках);

2) больших объемов при невысоких температурах 15–30°C на специальных полигонах – свалках, засыпанных слоем песка (получение свалочного газа).

### **3.5.2. Факторы, влияющие на процесс брожения**

Активность и репродуктивная способность микроорганизмов зависят от температуры. Сбраживание может происходить при различных температурах (до 54°C), причем чем выше температура, тем больше скорость сбраживания и больше выход биогаза, но меньше в газе доля метана. Различают три уровня температуры сбраживания:

1) психрофильный – температура около 20°C;

2) мезофильный – температура около 30–40°C;

3) термофильный – температура около 50–60°C.

В процессе сбраживания выделяется тепло порядка 1,5 МДж на 1 кг сухой массы. Этого обычно недостаточно для необходимого повышения температуры сбраживаемой массы. Для осуществления процесса сбраживания 95% массы должна составлять вода. Для максимальной производительности метанообразующих бактерий необходимо поддерживать содержание pH в диапазоне 6,6–7,6 (обычно корректируется известью), а также азота около 10% и фосфора около 2% от сухой массы сырья. Соотношение углерода и азота должно быть  $C/N = 10–16$ .

Следует учитывать, что некоторые органические соединения растений (например, лигнин) и все неорганические составляющие не поддаются сбраживанию. Среди отходов сельскохозяйственного производства наибольшее количество необходимых для метанового брожения веществ имеется у экскрементов животных (содержание азота 2–10%, фосфора – 0,2–2,7%, соотношение углерода и азота  $C/N = 9–15$ ). Так как жвачные животные потребляют корма с высоким содержанием сырой клетчатки, то выход газа из их экскрементов выше, чем из экскрементов кур и свиней. Однако отходы животноводства кроме экскрементов включают в себя различные количества воды, подстилочного материала и остатка кормов. Это может существенно повлиять на состав сырья.

Составы соломы (содержание азота 0,46–1,2%, фосфора – 0,08–0,19%, соотношение углерода и азота  $C/N = 9–15$ ) и ботвы (содержание азота 2–10%, фосфора – 0,2–2,7%, соотношение углерода и азота должно  $C/N = 30–165$ ) не соответствуют составу качественного сырья

для метанового сбраживания. Для сбраживания этих материалов необходимо добавление в них богатых азотом веществ, например куриного помета или свиного навоза.

### **3.5.3. Особенности и методы переработки отходов животноводства и растениеводства**

Отходы органического происхождения представляют собой и большую ценность (так как являются органическим удобрением и топливом), и опасность для окружающей среды (так как содержат различные вредные вещества).

Из органических отходов наибольшую опасность представляют свиноводческие отходы, куриный помет, навоз крупнорогатого скота. Непереработанные отходы несут большой вред, занимая огромные территории, являясь очагом зловония и опасных болезней. Например, свиноводческий комплекс мощностью 108 тыс. голов ежедневно выделяет в атмосферу 36 млрд. микробов, 3600 кг аммиака, 350 кг сероводорода. В зоне до 3 км такой комплекс является очагом инфекционных заболеваний: туберкулеза, бруцеллеза, лентоспироза. Поля в этой зоне перегружены стоками, а продукция растениеводства, полученная на этих полях, имеет низкое качество, загрязнена нитратами и нитритами. Так как основной способ очистки комплекса гидравлический, то комплекс в сутки потребляет 3000 м<sup>3</sup> воды, что соответствует суточной потребности в воде 2000 чел.

Сельскохозяйственные животные часто поражаются заболеваниями, вызываемыми паразитическими червями – гельминтами. Из-за пораженности животных гельминтами они потребляют кормов больше на 11%, а привес имеют на 15% меньше, чем у здоровых животных. Снизить степень пораженности животных гельминтами и болезнетворными бактериями можно лишь при внедрении в практику мер, профилактирующих возможность заражения.

Обычно гельминтами животные заражаются, заглатывая с кормом или водой их яйца-личинки, которые попадают во внешнюю среду с калом животных. Следовательно, крайне важно производить уничтожение яиц гельминтов перед использованием навоза его в качестве удобрения, особенно на пастбищах и полях, предназначенных под кормовые культуры.

Методы дегельминтизации «твердого» подстилочного навоза разработаны еще в 30-х годах прошлого столетия. Яйца и личинки гельминтов не переносят температуру свыше 40° и в течение примерно минуты погибают при температуре 60°. Исходя из этого был предложен



метод биометрической дегельминтизации навоза, основанный на явлении самонагревания навоза при аэробном брожении.

Десятидневное метановое сбраживание навоза в бродильных камерах биогазовой установки обеспечивает полное обеззараживание навоза от яиц и личинок ряда болезнетворных бактерий, гельминтов (аскарид, трихоцефалов, дикростомов и стронгоидов). Установлено также, что мухи в сброженном навозе не размножаются, отложенные в нем личинки погибают.

При этом анаэробный метод переработки отходов с санитарно-экологической позиции имеет следующие преимущества перед другими методами обеззараживания навоза:

- 1) быстрота обеззараживания (5–20 суток по сравнению с 6–12 месяцами в открытом накопителе);
- 2) из-за герметичности емкости переработка осуществляется без запаха;
- 3) дезодорация – уничтожение запаха;
- 4) полная дегельминтация – уничтожение яиц гельминтов.

В 80-х годах в Республике Беларусь на 1 га вносили 15 т необработанных органических удобрений, 250 кг минеральных удобрений и 3,8 кг средств защиты растений. При этом установлено, что менее половины объема удобрений потребляется культурными растениями. Например, по азотным удобрениям картина потребления имеет следующий вид: культурными растениями – 39%, сорняками – 46%, теряется безвозвратно – 15%. Это обусловлено тем, что вместе с органическими удобрениями в почву вносилось множество семян сорняков, а питательные вещества в навозе находятся в трудноусвояемой форме. Нерациональное использование удобрений и ядохимикатов привело к тому, что вследствие загрязнения химическими элементами более трети колодцев в сельской местности в Республике Беларусь не соответствует стандартам качества воды.

Важным фактором является то, что производство минеральных удобрений требует значительных энергозатрат. Так, на производство 1 кг азотных удобрений требуется 55–60 Дж энергии, 1 кг фосфорных – 10–14 Дж, 1 кг калийных – 4,6–5,0 Дж. В 1990 году в Республике Беларусь на поля внесено 2 млн. т минеральных удобрений, или, в пересчете на энергию, 2,2 млн. т у. т. Кроме того производство минеральных удобрений сопровождается выбросом большого количества вредных веществ.

Анаэробное сбраживание навоза и растительных отходов в биогазовых установках обогащает их бактериями метанового брожения, повышает удобрительные качества за счет сохранения питательных ве-

ществ и перевода значительной части их в легкоусвояемую растениями минеральную форму. Фосфор и калий практически полностью сохраняются в сброженной массе, а потери азота не превышают 5% (при аэробном сбраживании потери азота составляют около 40%).

Анаэробная переработка органического удобрения позволяет полностью отказаться или значительно сократить использование минеральных удобрений без потери урожая. Практикой установлено, что использование переработанного анаэробным методом навоза повышает урожайность зерновых и картофеля на 20–30% по сравнению с применением несброженного навоза. Кроме того, из 80 т навоза получается всего 1 т шлама, что значительно снижает затраты на транспортировку и внесение в почву удобрения.

Следовательно, переработка различных отходов носит комплексный характер и позволяет решить ряд важных проблем: санитарно-экологическую (обезвреживание отходов), агрохимическую (получение органического удобрения), энергетическую (получение топлива).

### **Получение биогаза в метантенках**

Получение биогаза в метантенках становится экологически и экономически оправданным, когда метантенк перерабатывает близлежащие потоки отходов. Например, отходы животноводческих ферм, скотобоен, стоки канализационных систем и т. п. Экономичность в этом случае связана с тем, что нет нужды в предварительном сборе отходов, в организации и управлении процессом их подачи. КПД метантенка, который определяется как отношение энергии биогаза к энергии исходного сухого материала, достигает 60–90%.

Схема биогазовой установки представлена на рис. 3.11. Сырье, содержащее 2–10% органических веществ, из отстойника 1 через теплообменник 2, где оно подогревается до температуры ферментации, подается в метантенк 3.

Метантенки выполняются из железобетона, стали или полимерных материалов. Они могут иметь разную форму и конструкцию, от кубической до цилиндрической, расположены горизонтально или вертикально. Наибольшее распространение получили метантенки яйцеобразной и цилиндрической с конусным основанием конструкции.

Метантеки снабжаются мешалками для перемешивания бродящей массы с целью ускорения процессов и теплообменниками для поддержания необходимой температуры сбраживаемой биомассы. Перемешивание способствует равномерному распределению питательных веществ в объеме реактора и препятствует образованию осадка на дне

метантенка. В отсутствие перемешивания на поверхности биомассы вначале образуется пена, а затем твердая корка, которая может привести к полной остановке процесса сбраживания.

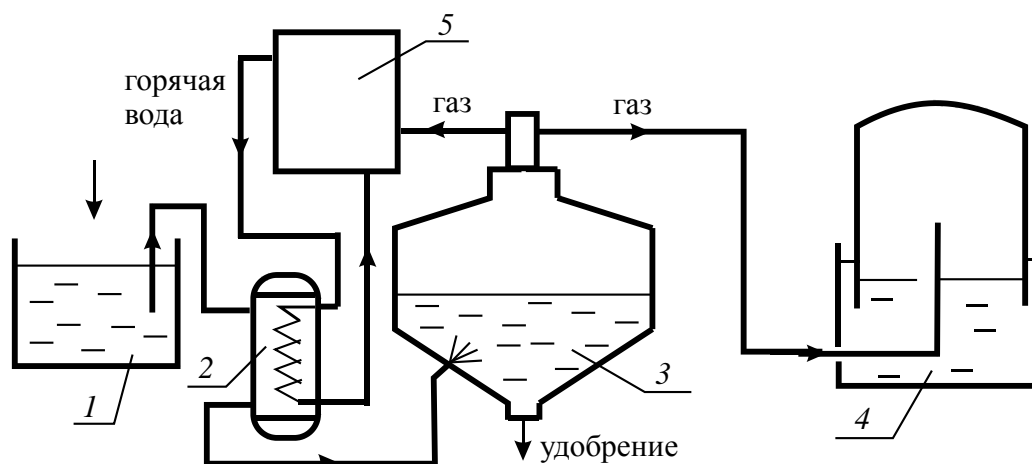


Рис. 3.11. Схема биогазовой установки

Образующиеся газы удаляются через газовый колпак, расположенный в верхней части метантенки. Газ по газопроводу поступает в котел 5 или в газохранилище – газгольдер 4. Из каждой тонны навоза выделяется в среднем  $50 \text{ м}^3$  биогаза.

Метановое брожение – процесс эндотермический, требует постоянного подогрева для поддержания необходимой температуры ферментации. Как правило, метантенки и сырье подогреваются за счет сжигания образующегося биогаза. В среднем на поддержание требуемой температуры ферментации расходуется от 15–20% (мезофильный процесс) до 30–50% (термофильный процесс) биогаза. Поэтому одним из важных моментов эксплуатации метантенков является их хорошая теплоизоляция.

Процесс брожения биомассы в метантенке идет достаточно долго. Сначала распадаются легкоразлагающиеся органические вещества с наибольшим выходом биогаза, а затем начинают распадаться трудноразлагающиеся органические вещества с заметно меньшей скоростью выхода биогаза. Поэтому, исходя из экономических соображений, на практике время продолжительности процесса брожения выбирают равное времени разложения до 40–50% органических веществ (от 8 до 20 суток).

Во многих странах мира созданы и введены в эксплуатацию малогабаритные фермерские и крупные промышленные установки по переработке навоза в биогаз. Например, в Швейцарии насчитывается свыше 200 установок. Большинство из них работает при температуре  $28\text{--}37^\circ\text{C}$ .

Есть установки, расположенные под полом коровника, что позволяет максимально использовать тепло навоза. В Индии работает свыше 500 тыс. биогазовых установок, и поэтому биогаз покрывает на 44% потребность страны в электроэнергии. Успешно используются биогазовые установки в Голландии, Великобритании, Китае и других странах.

### 3.5.5. Методика определения технических параметров метантенка

#### 1. Объем навозоприемника:

$$V_n = k \cdot m_{\text{сут}} \cdot t_{\text{сб}} / \rho_n,$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий изменение плотности навоза, в зависимости от исходной влажности ( $k = 1,5$ );  $t_{\text{сб}}$  – время накопления навоза, продолжительность сбраживания в метантенке (от 8 до 20 суток), сут;  $m_{\text{сут}}$  – суточный выход навоза с начальной влажностью  $\omega$  (около 92%), кг/сут;

$$\omega = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{сут}}} = \frac{m_{\text{сут}} - m_{0\text{сут}}}{m_{\text{сут}}}, \quad m_{0\text{сут}} = m_{\text{сут}} (1 - \omega) \quad \text{– суточный выход сухого}$$

сбраживаемого материала, кг/сут;  $\rho_n$  – плотность навоза, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_n = 1020$  кг/м<sup>3</sup>).

#### 2. Объем метантенка:

$$V_m = m_{0\text{сут}} \cdot t_{\text{сб}} \cdot \upsilon,$$

где  $\upsilon$  – удельный вес жидкой массы на 1 кг сухого сбраживаемого материала, 0,02 м<sup>3</sup>/кг.

#### 3. Суточный выход биогаза:

$$B_6 = m_{0\text{сут}} \cdot b, \text{ м}^3/\text{сут},$$

где  $b$  – удельный выход биогаза, приходящийся на 1 кг переработанного навоза (от 0,2 до 0,4 м<sup>3</sup>/кг).

#### 4. Общая тепловая энергия получаемого биогаза:

$$Q_{\text{общ}} = B_6 \cdot Q_6, \text{ МДж/сут},$$

где  $Q_6 = 20\text{--}25$  МДж/м<sup>3</sup> – теплота сгорания биогаза.

5. Расход теплоты на нагрев жидкой массы в метантенке с  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 35^\circ\text{C}$  (мезофильный режим).

$$Q_n = c_n \cdot m_{0\text{сут}} \cdot \upsilon \cdot \rho_n (t_2 - t_1) / \eta, \text{ МДж/сут},$$

где  $c_n$  – теплоемкость жидкой массы ( $c_n = 0,00406$  МДж/(кг·°C));  $\eta$  – КПД нагревательного устройства ( $\eta = 0,7$ ).

6. Расход теплоты на собственные нужды:

$$Q_{с.н} = 1,06 Q_n, \text{ МДж/сут,}$$

где 1,06 – коэффициент, учитывающий тепловые потери.

7. Общее количество биогаза, идущего на собственные нужды:

$$B_{с.н} = Q_{с.н} / Q_b, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

8. Выход товарного биогаза:

$$B_{б.т} = B_b - B_{с.н}, \text{ м}^3/\text{сут.}$$

9. Коэффициент расхода биогаза на собственные нужды (0,15–0,5):

$$\varphi_b = B_{с.н.} / B_b.$$

10. Объем газгольдера:

$$V_{г} = t_{н.б} \cdot B_{б.т}, \text{ м}^3,$$

где  $t_{н.б}$  – время накопления биогаза, сут.

### 3.5.6. Добыча и утилизация свалочного газа

Одним из основных способов удаления твердых бытовых отходов во всем мире остается захоронение в приповерхностной геологической среде. В этих условиях отходы подвергаются интенсивному биохимическому разложению, которое вызывает, в частности, генерацию свалочного газа.

Эмиссии свалочного газа, поступающие в природную среду, формируют негативные эффекты как локального, так и глобального характера. По этой причине во многих развитых странах мира осуществляются специальные мероприятия по минимизации эмиссии свалочного газа. Это фактически привело к возникновению самостоятельной отрасли мировой индустрии, которая включает добычу и утилизацию свалочного газа.

Существенная часть фракций твердых бытовых отходов повсеместно представлена различными органическими материалами. Основными группами среди них являются пищевые остатки и бумага. В среднем доля органических фракций твердых бытовых отходов колеблется от 56% до 62%. В условиях захоронений быстро формируются анаэробные условия, в которых протекает биоконверсия органического вещества. В результате этого процесса образуется биогаз, или так называемый свалочный газ.

Существенное варьирование газопродуктивности и скорости процесса определяется условиями среды, сложившимися в конкретном сва-

лочном теле. К числу параметров, влияющих на скорость газообразования, относятся влажность, температура, состав органических фракций.

Как правило, в составе органического вещества выделяют быстро-, средне- и медленноразлагающиеся материалы. Они существенно различаются по своим физико-химическим свойствам и сроком биологического распада. Так, например, разложение «быстрых» фракций завершается в течение 2–4 лет, в то время как биоконверсия «медленных» протекает в течение десятилетий.

Можно утверждать, что в среднем газогенерация заканчивается в свалочном материале в течение 10–50 лет, при этом удельный выход газа составляет 120–200 м<sup>3</sup> на тонну твердых бытовых отходов. Для большинства органического материала наиболее интенсивно процесс газообразования протекает в первые 5 лет, за которые выделяется около 50% полного запаса свалочного газа.

Основными компонентами свалочного газа являются метан (CH<sub>4</sub>) и диоксид углерода (CO<sub>2</sub>). Их соотношение может меняться от 40–70% до 30–60% соответственно. В существенно меньших концентрациях на уровне около процента присутствуют, как правило, азот (N<sub>2</sub>), кислород (O<sub>2</sub>), водород (H). В качестве малых примесей в состав свалочного газа могут входить десятки различных органических соединений.

Состав свалочного газа обуславливает ряд его специфических свойств.

1. Свалочной газ горюч, его средняя теплота сгорания составляет примерно 23 МДж/м<sup>3</sup>.

2. В определенных концентрациях он токсичен. Конкретные показатели токсичности определяются наличием ряда микропримесей, таких, например, как сероводород (H<sub>2</sub>S).

3. Обычно свалочной газ обладает резким неприятным запахом.

Приведенный перечень негативных явлений, обусловленных свалочным газом, убедительно свидетельствует о необходимости борьбы с его выделением. В большинстве развитых стран существуют специальные законы, обязывающие владельцев полигонов предотвращать стихийное распространение свалочного газа. Основным методом, обеспечивающим решение этой задачи, является технология утилизации свалочного газа.

Для извлечения свалочного газа на полигонах используется сеть вертикальных газодренажных скважин, соединенных линиями газопроводов, в которых компрессорная установка создает разрежение, необходимое для транспортировки свалочного газа до места использования. Установки по сбору и утилизации монтируются на специально подготовленной площадке за пределами свалочной массы.

Сооружение газодренажной системы может осуществляться как целиком на всей территории полигона твердых бытовых отходов после окончания его эксплуатации, так и на отдельных участках полигона в соответствии с очередностью их загрузки. При этом надо учитывать, что для добычи свалочного газа необходимо, чтобы толщина слоя твердых бытовых отходов составляла не менее 10 м. Желательно также, чтобы территория полигона твердых бытовых отходов была перекрыта слоем грунта мощностью не менее 30–40 см.

Для добычи свалочного газа на полигонах твердых бытовых отходов применяются вертикальные скважины. Обычно они располагаются равномерно по территории свалочной массы с шагом 50–100 м между соседними скважинами. Их диаметр колеблется в интервале 200–600 мм, а глубина определяется мощностью свалочного тела и может составлять несколько десятков метров.

При бурении скважин в толще отходов в условиях Беларуси наиболее целесообразным является использование шнекового бурения. Оно сравнительно недорого и легкодоступно, так как широко используется в инженерно-геологических изысканиях. При использовании этого вида бурения максимально диаметр скважин составляет 250–500 мм. Однако их строительство может встречать ряд трудностей, связанных с присутствием большого количества инородных включений (металлических и бетонных конструкций, остатков техники, механизмов и пр.) в свалочной толще, затрудняющих бурение и приводящих к частой поломке бурового инструмента.

Инженерное обустройство скважины включает несколько этапов (рис. 3.12). На первом в скважину опускается перфорированная стальная или пластиковая труба 1, заглушенная снизу и снабженная фланцевым соединением в приустьевой части. Затем в межтрубное пространство засыпается пористый материал 2 (например, гравий) с послойным уплотнением до глубины 3–4 м от устья скважины. На последнем этапе сооружается глиняный замок 3 мощностью 3–4 м для предотвращения попадания в скважину атмосферного воздуха.

Температура свалочного газа в толще отходов может достигать 40–50°C, а содержание влаги – 5–7%. После экстракции из свалочного тела газа и его поступления в транспортные газопроводы происходит резкое снижение температуры, что приводит к образованию конденсата, который может выделяться в значительных количествах. Ориентировочно при добыче свалочного газа в объеме 100 м<sup>3</sup>/ч образуется около 1 м<sup>3</sup> конденсата в сутки.

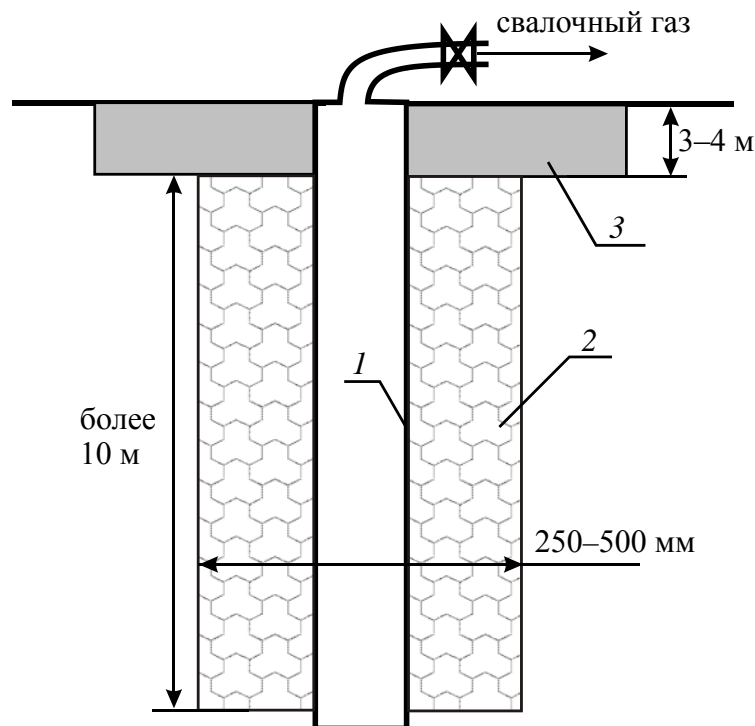


Рис. 3.12. Схема обустройства скважины

Поэтому отвод конденсата с помощью специальных устройств является задачей первостепенной важности, так как его наличие в газопроводе может затруднить или сделать невозможной экстракцию свалочного газа.

При выборе материалов для газопроводов обычно рассматривают два варианта: использование пластиковых или стальных труб. Их сравнительный анализ проводится по следующим критериям:

- механическая прочность;
- коррозионная стойкость;
- возможность использования в просадочных грунтах.

Основное преимущество стальных труб обусловлено механической прочностью и их повсеместным использованием при строительстве газопроводов. Пластиковые трубы характеризуются высокой коррозионной стойкостью и пластичностью. С учетом высокой просадочной способности твердых бытовых отходов и высокой коррозионной активности свалочного газа для прокладки газопровода рекомендуется использовать пластиковые трубы из полиэтилена низкого давления. Полиэтиленовые газопроводы обладают рядом преимуществ по сравнению с металлическими: они гораздо легче, обладают достаточной прочностью, эластичностью и коррозионной стойкостью, хорошо свариваются, не требуют электрохимической защиты. Производи-



тельность труда при строительстве полиэтиленовых газопроводов в 2,5 раза выше.

По системе трубопроводов свалочный газ поступает на пункт сбора, который предназначен для принудительного извлечения газа из свалочной толщи с помощью специального электровентилятора, создающего в системе газопроводов небольшое разрежение (около 10 Па).

В мировой практике известны следующие способы утилизации свалочного газа:

- факельное сжигание, обеспечивающее устранение неприятных запахов и снижение пожароопасности на территории полигона твердых бытовых отходов, при этом энергетический потенциал свалочного газа не используется в хозяйственных целях;
- прямое сжигание свалочного газа для производства тепловой энергии;
- использование свалочного газа в качестве топлива для газовых двигателей или турбин с целью получения электроэнергии и тепла;
- доведение содержания метана в свалочном газе (обогащение) до 94–95% с последующим его использованием в газовых сетях общего назначения.

Целесообразность применения того или иного способа утилизации свалочного газа зависит от конкретных условий хозяйственной деятельности на полигоне твердых бытовых отходов.

### **3.5.7. Подготовка к использованию и аккумулирование биогаза**

При подготовке биогаза к использованию могут проводиться следующие мероприятия:

- удаление  $\text{H}_2\text{S}$  (обессеривание);
- удаление  $\text{CO}_2$ ;
- компримирование и сжижение.

**Обессеривание биогаза** проводят для удаления ядовитой части биогаза и для предотвращения сернокислотной коррозии в процессе сжигания биогаза. Наиболее экономичным и безопасным методом считается каталитический с применением  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Этот метод можно представить в виде формулы



Регенерация массы в присутствии воздуха выражается зависимостью



**Удаление  $\text{CO}_2$**  проводят для повышения теплоты сгорания биогаза, что позволяет использовать его в стандартных газомазутных котлах. Абсорбционная очистка биогаза от  $\text{CO}_2$  очень затратная и будет рациональна и экономична при очень высоком суточном выходе газа и утилизации удаляемого  $\text{CO}_2$ .

**Компримирование и сжижение** биогаза проводят для использования его в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания. Как показал практический опыт компримирование и сжижение (при атмосферном давлении и температуре  $-161^\circ\text{C}$ ) биогаза нецелесообразны по двум причинам: из-за большой дополнительной массы баллонов для переработанного газа и высокой стоимости компримирования и сжижения биогаза. Например, для одной смены работы трактора понадобится восемь баллонов весом 50 кг каждый.

Для рационального использования генераторного газа необходимо предусмотреть аккумулирование газа в определенном объеме, поскольку производство газа и его потребление не соответствуют друг другу.

Для биогазовых установок небольших предприятий можно применять газгольдер высокого давления, мокрый газгольдер низкого давления, сухой газгольдер низкого давления.

**Газгольдеры высокого давления** обычно имеют сферическую форму и работают при давлении 0,8–1 МПа, их вместимость 10–100 тыс.  $\text{м}^3$ . К преимуществам относятся сравнительно небольшие габариты и отсутствие каких-либо движущихся частей. Недостатком считается необходимость применения компрессорной установки. Для использования биогаза в качестве топлива требуется после газгольдера понизить его давление до 1–5 кПа.

**Мокрые газгольдеры низкого давления** имеют вместимость 500–3000  $\text{м}^3$  (рис. 3.13). Их недостаток – опасность замораживания зимой, что вызывает необходимость в их обогреве или применение незамерзающей жидкости. Достоинства – поддерживают постоянное давление, обусловленное весом колпака; простота и надежность. Мокрые газгольдеры низкого давления, которые почти всегда плавают непосредственно в бродильной камере, получили широкое распространение в Восточной Азии.

**Сухие газгольдеры низкого давления** могут быть манжетного, оболочкового, баллонного или других типов. Для сохранения постоянного давления служит помещенный сверху груз, который может пере-

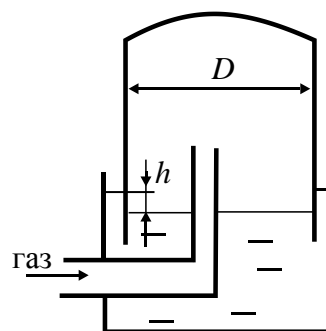


Рис. 3.13. Мокрый газгольдер

мещаться по вертикали. Они имеют номинальную вместимость 5–300 000 м<sup>3</sup>, рабочее давление составляет 2–5 кПа. В среднем такой газгольдер на 20% дешевле, чем мокрый.

Стоимость газгольдеров достаточно высока (20–30% от стоимости биогазовой установки). Поэтому, исходя из экономических соображений, газгольдер нужно строить небольшого размера, чтобы он использовался только для выравнивания суточных пиков в потреблении газа. Нужно попытаться планировать более равномерное потребление газа, без пиков. В случае неравномерного сезонного потребления биогаза следует предусмотреть резервный источник энергии.

**Расчет газгольдера.** Давление в газгольдере низкого давления определяется весом колокола или груза:

$$p = (mg) / S,$$

где  $m$ ,  $S$  – масса и площадь горизонтальной проекции колокола или груза соответственно.

Объем газгольдера определяется из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$V = mRT / p,$$

где  $m$  – масса биогаза;  $R$  – газовая постоянная биогаза;  $T$  – температура биогаза.

Перепад жидкости снаружи и под колоколом в мокром газгольдере определяется из основного уравнения гидростатики:

$$h = p / (\rho g).$$

### **3.5.8. Получение тепловой энергии при аэробном окислении**

Кроме методов анаэробной биоконверсии биомассы в топливо возможен другой микробиологический процесс получения энергии – аэробное окисление твердой биомассы (отходов) с выделением больших количеств тепла.

Твердое органическое сырье погружается в шахту, снизу подается воздух. В результате окислительных процессов, осуществляемых микроорганизмами, происходит интенсивное выделение тепловой энергии и проходящие газы нагреваются до 80°C. С помощью компрессии температуру газов можно увеличить до 100–110°C и получаемую энергию аккумулировать в виде горячей воды или пара. Коэффициент полезного действия установок с учетом затрат электроэнергии на эксплуатацию воздуходувок составляет 95%. Такие установки промышленного типа

работают в Японии. Образующийся шлам используется в качестве высокоэффективного органоминерального удобрения.

### 3.6. Получение спиртов

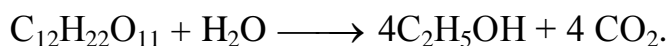
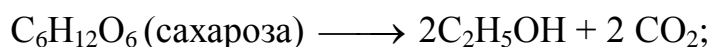
#### 3.6.1. Методы получения спирта

Возможность широкого использования низших спиртов: метанола, этанола, бутанола, бутандиола, а также ацетона и других растворителей в качестве моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания и дизельных двигателей вызвала большой интерес к процессу получения перечисленных соединений путем биоконверсии из растительной биомассы.

Микробиологическое получение этилового, бутилового спиртов и бутандиола из углеводов достаточно хорошо изучено и имеет многолетний промышленный опыт.

**Этиловый спирт (этанол)**  $C_2H_5OH$  в естественных условиях образуется из сахаров соответствующими микроорганизмами в кислой среде, pH – от 4 до 5. Подобный процесс спиртовой ферментации во всем мире используют для получения питьевого спирта. Наиболее часто используемые микроорганизмы – дрожжи вида *Saccharomyces cerevisiae* – погибают при концентрации спирта выше 10%, поэтому для повышения концентрации используют перегонку. После перегонки (дистилляции) получается кипящая при постоянной температуре смесь: 95% этанола и 5% воды. Обезвоженный этанол в промышленных условиях производится путем совместной перегонки с растворителем типа бензола. При брожении теряется лишь 0,5% энергетического потенциала сахаров, остальные затраты энергии связаны с перегонкой. Необходимую тепловую энергию можно получить, сжигая остающиеся отходы биомассы.

Этиловый спирт обычно получают с помощью брожения, вызываемого дрожжами:



В качестве сырья используются меласса (отходы сахарного производства), зерновой, картофельный, кукурузный крахмал, который предварительно осахаривается.

Этиловый спирт образуют бактерии, например, из рода *Zymomonas* (*Z. mobilis*, *Z. anaerobica*), *Sarcina ventriculi* и *Erwinia amylovora*. Среди производителей этанола имеются и клостридии, к их числу относятся *Clostridium thermocellum* и *Cl. thermohydrosulphuricum*. В последнее

время эти микроорганизмы интенсивно изучают, так как некоторые из них способны использовать в качестве сбраживаемого субстрата не только крахмал, но такой непищевой и дешевый продукт, как целлюлоза. Бутиловый спирт и ацетон в промышленности также получают с помощью бактерий из рода клостридий.

Использование этанола и бутанола как моторных топлив требует их промышленного производства в объеме десятков миллионов тонн. Для этого требуется множество непищевого, дешевого и легкоконвертируемого сырья.

В некоторых странах (например, Бразилии) для производства технического этанола используют отходы сахарного тростника – багассу, в других странах – маниок, батат, сладкое сорго, топинамбур (земляная груша). Указанные культуры являются представителями южных растений. Для стран с умеренным климатом и обладающих большими лесными массивами дешевым сырьем для крупнотоннажного производства спиртов служит древесина.

Ниже перечислены процессы производства этанола из различных культур в порядке возрастания трудностей переработки.

1. Непосредственно из сахарного тростника. Обычно промышленную сахарозу получают из сока сахарного тростника, а остающуюся патоку используют для получения спирта. На практике выход ограничивается конкурирующими реакциями и потреблением сахарозы на увеличение массы дрожжей. Промышленный выход составляет около 80% выхода.

2. Из сахарной свеклы вначале получают сахар для сбраживания, но свекла не дает достаточного количества отходов для получения тепла. Из-за этого этанол дорожает.

3. Из растительного крахмала, например из злаковых, который можно также подвергнуть гидролизу на сахар. Это основной энергоаккумулирующий углевод растений. Состоит из двух компонентов с большой молекулярной массой, амилозы и амилопектина. Эти крупные молекулы четко линейны и состоят из глюкозных остатков, соединенных углеродными связями, которые могут быть разрушены ферментами солода, содержащегося в некоторых культурах, например в ячмене, или ферментами подходящих плесеней (грибков). Разрушить углеродные связи в крахмале можно и при обработке их сильными кислотами ( $\text{pH} \approx 1,5$ ) при давлении 0,2 МПа, но выход сахаров при этом снижается, а сам процесс по сравнению со сбраживанием удорожается.

4. Из целлюлозы, которая содержит до 40% всей сухой биомассы и потенциально является обширным возобновляемым источником энергии. К растительным материалам, используемым для получения

сахара с последующей их биоконверсией в спирты, относят различные виды отходов лесопиления и деревообработки, сельскохозяйственного производства (солома, хлопчатник, кукурузная кочерыжка, подсолнечная лузга, костра льна, конопли, малоразложившийся торф).

В растениях целлюлоза тесно связана с лигнином, препятствующим ее гидролизу до сахаров. Соответствующие связи молекул глюкозы в целлюлозе значительно труднее поддаются гидролизу, чем у крахмала. Древесина может использоваться как сырье при условии разрушения структурных связей лигнина с целлюлозой и гидролизом последней, т. е. требуется определенная химическая или биохимическая предобработка. Это сдерживает широкое использование древесины для получения спиртов.

Для возможного применения древесины в целях получения биопродуктов в настоящее время интенсивно разрабатываются различные технологии деструкции лигноцеллюлоз:

- 1) механические (размалывание);
- 2) физические (гамма-облучение);
- 3) физико-химические (паровой взрыв, или парокрекинг);
- 4) химические (гидролиз) – превращение целлюлозы в сахара возможно путем нагревания ее в серной кислоте;
- 5) биологические (ферментативный гидролиз);
- 6) различные комбинации перечисленных методов.

К наиболее перспективным следует отнести сочетание «парокрекинга» с ферментативным гидролизом – это предварительная обработка лигноцеллюлоз паром при высокой температуре и высоком давлении, при котором происходит взрыв кристаллических структур указанных субстратов и отделение лигнина от целлюлозы с последующим гидролизом клетчатки.

Большие перспективы для использования целлюлозы в качестве сырья для получения самых разных продуктов открывает ферментативный гидролиз, осуществляемый некоторыми грибами и бактериями. Гидролиз протекает при 40–60°C и pH 4,0–7,0, не требует больших энергозатрат и коррозионностойкого оборудования. Но в этом случае процесс идет очень медленно.

В основе промышленного процесса лежит использование измельченной древесной массы или старых газет. Механическое разрушение древесины – наиболее энергоемкая и дорогая стадия процесса.

В ряде стран в течение многих лет существует промышленное производство этилового спирта путем брожения гидролизатов древесины. Такой способ основан на кислотном или щелочном гидролизе

древесины, которые далее сбраживаются дрожжами до этанола. Но такая технология достаточно энергоемка и требует использования коррозионно-устойчивого оборудования (основное препятствие ее широкого использования в практике).

Из одной тонны древесины можно получить до 170–180 л этанола, из тонны картофеля – 100 л этанола, из тонны зерна ржи – до 270 л этилового спирта. Следовательно, одна тонна древесины при производстве этанола заменяет около 0,6 т зерна, или 1,7 т картофеля.

### **3.6.2. Использование этанола в качестве топлива**

Жидкие топлива чрезвычайно важны из-за удобства использования и хорошего управления сгоранием в двигателях. Можно вводить в несколько переделанные бензиновые двигатели 95%-ный этанол, а можно подавать в обычный двигатель смесь из 100%-ного этанола (обезвоженный) с бензином в соотношении 1 : 10.

**Обезвоженный этанол** – жидкость в интервале температур от – 117 до +78°C с температурой воспламенения 423°C. Применение его в двигателе внутреннего сгорания требует специального карбюратора. Поэтому и смешивают бензин с обезвоженным этанолом (20% по объему) и используют данную смесь (газохол) в обычных бензиновых двигателях. **Газохол** в настоящее время – обычное топливо в Бразилии (этанол там получают из сахарного тростника и маниока), используют его и в США (этанол из кукурузы). Важная особенность этанола – способность выдерживать ударные нагрузки без взрыва, из-за этого он гораздо предпочтительнее добавок из тетраэтилсвинца, вызывающего серьезные загрязнения атмосферы. Превосходные свойства этанола как горючего обеспечивают двигателям 20%-ное увеличение мощности по сравнению с чистым бензином. Массовая плотность и теплотворная способность этанола ниже, чем бензина, соответственно теплота сгорания (24 МДж/м<sup>3</sup>) на 40% ниже, чем бензина (39 МДж/м<sup>3</sup>). Однако лучшее горение этанола компенсирует это уменьшение теплотворной способности. Опыт подтверждает, что двигатели потребляют примерно одинаковое количество газохола и бензина.

Таким образом, биомасса при ее рациональном использовании может стать эффективным источником возобновления энергетических ресурсов с использованием микробиологических процессов. Однако вклад биомассы в общую энергетику большинства развитых стран не превысит 10%, в отдельных странах он может составить 25–30%, но не более, так как в противном случае она перестает быть возобновляемым источником.

## 4. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Гидроэнергетикой называют область энергетики, использующей энергию падающей воды (энергия рек). Кроме гидроэнергетики, водными источниками энергии являются волны и приливы. Утилизация энергии рек осуществляется на гидроэлектростанциях (ГЭС) с помощью турбин.

Гидроэнергетика является наиболее развитой областью энергетики на возобновляемых источниках энергии. Нетрадиционные возобновляемые источники электроэнергии, такие, как энергия солнца, ветра, геотермальных вод, не могут, по крайней мере в настоящее время, успешно конкурировать с малыми ГЭС, отличающимися большей изученностью, меньшими удельными капиталовложениями, отработанной технологией производства энергетического оборудования, более простой и дешевой эксплуатацией. Кроме того, перечисленные источники энергии, даже, может быть, в большей степени, чем реки, привязаны к конкретным географическим районам, и возможность их использования предусматривает наличие близко расположенного потребителя.

При сопоставлении малых ГЭС с другими традиционными источниками децентрализованного электроснабжения в настоящее время выделяют следующие их достоинства:

- доступность и возобновляемость дешевого источника энергии;
- известная и не представляющая сложностей технология производства оборудования и строительных работ;
- простая эксплуатация, включающая возможность полной автоматизации обслуживания;
- минимальное отрицательное влияние на окружающую среду;
- улучшение водообмена и аэрации воды и, как следствие, улучшение кислородного режима и повышение биологической активности реки;
- возможность строительства ГЭС на основе существующих специализированных водохозяйственных систем (судоходными, ирригационными водоснабжения, очистными, рыборазведения, разведения водоплавающей птицы и т. п.).

По сравнению с тепловыми электростанциями ГЭС обладают следующими преимуществами:

- возобновляемостью (неистощимостью) энергоресурсов рек;
- относительно низкой себестоимостью вырабатываемой на ГЭС электроэнергии (примерно в 8 раз меньше, чем на тепловых электростанциях);



- срок службы механического оборудования на гидроэлектростанциях более чем в три раза больше, по сравнению с оборудованием на тепловых электростанциях (около 50 лет). Это обусловлено равномерностью режима работы и отсутствием экстремальных температур и других нагрузок;

- отсутствием выбросов вредных веществ в атмосферу;

- высокой маневренностью ГЭС в процессе обеспечения потребителей электроэнергией, что позволяет вырабатывать более дорогую пиковую электроэнергию (в России стоимость пиковой электроэнергии в 5,5 раз выше, чем стоимость ночной электроэнергии);

Вместе с тем использование энергии водотоков малыми ГЭС может сдерживаться следующими отрицательными обстоятельствами – зависимостью выработки электроэнергии ГЭС от гидрологических и метеорологических условий. Создание ГЭС связано с большими удельными первоначальными затратами (капитальными вложениями), которые на 1 кВт мощности в два и более раза выше таковых в тепловых электростанциях. Возможно также негативное влияние водохранилищных ГЭС на окружающую природную среду и условия проживания людей в зонах влияния. Это проявляется, прежде всего, в затоплении и последствиях подтопления земель.

Гидроэлектростанция состоит из следующих основных элементов (рис. 4.1): водохранилища (верхний бьеф) 1, напорного водовода 2, гидротурбины 3, электрогенератора 4, отсасывающей трубы 5, нижнего бьефа 6.

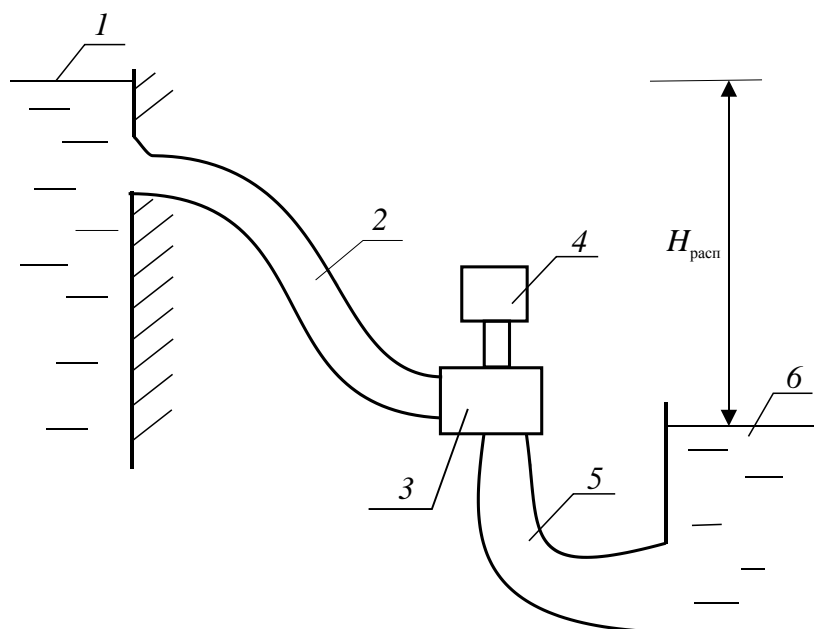


Рис. 4.1. Принципиальная схема ГЭС

Водохранилище является источником потенциальной энергии и создается с помощью плотины, которая позволяет обеспечить стабильный расход воды через турбину. Водохранилище и напорный водовод являются наиболее дорогими элементами гидроэлектростанции. Диаметр водовода не может быть слишком маленьким, так как при этом возрастут потери на трение  $h_{\text{пот}} \approx d^{-5}$ . Обычно рассчитывают, что  $h_{\text{пот}} < 0,1 H$ .

Из анализа структуры капитальных затрат в ГЭС следует, что основной вклад в стоимость их строительства обычно вносят затраты на создание их водохранилищ в долинах равнинных рек – от 35 до 50% и более.

В настоящее время нет общепринятого для всех стран понятия малой гидроэлектростанции, однако во многих странах в качестве основной характеристики такой ГЭС принята ее установленная мощность. По принятой в СССР классификации к малым формам гидроэнергетики относят микро- (до 0,1 МВт), мини- (до 1 МВт) и малые ГЭС (до 25 МВт).

#### **4.1. Гидроэнергетические ресурсы Республики Беларусь**

Потенциальные гидроэнергетические ресурсы Республики Беларусь обусловлены расположением в середине ее равнинной территории водораздела между бассейнами Балтийского и Черного морей, который делит страну на две почти равные части, вследствие чего вытекающие отсюда реки не могут достигнуть значительной мощности прежде, чем оставляют ее границы. Это предопределяет строительство в республике главным образом малых гидроэлектростанций.

Состояние гидроэнергетики страны характеризуется соотношением запасов ее гидроэнергетических ресурсов (гидроэнергopotенциала ее рек) и масштаба их освоения.

Запасы гидроэнергоресурсов Республики Беларусь составляет теоретический потенциал ее рек – около 7,5 млрд. кВт·ч в средний по водности год, а его часть, которая путем выработки электроэнергии на ГЭС или иными техническими средствами может быть использована (технический потенциал), – 2,5–3,0 млрд. кВт·ч/год. В настоящее время экономический гидроэнергopotенциал в Республике Беларусь составляет 1,3 млрд. кВт·ч/год, или 325 МВт общей установленной мощности возможных ГЭС в условиях Беларуси.

Как источники энергии реки в Беларуси использовали издавна посредством сооружения многочисленных водяных мельниц и других

гидросиловых установок, для которых возводились плотины простейшего типа, обеспечивавшие поддержание небольших подпоров воды – высотой до 3 м. К 1941 году на территории Республики Беларусь действовало более тысячи водяных мельниц. Некоторые из них затем реконструировались в мелкие гидроэлектростанции.

Всего в республике в начале 60-х годов прошлого столетия действовало около 180 ГЭС общей мощностью 21 МВт с годовой выработкой электроэнергии в средний по водности год 88 млн. кВт·ч. Сельское хозяйство Беларуси в 1959 г. получило от ГЭС около 20% всей потребленной им электроэнергии. Однако дальнейшее развитие малой гидроэнергетики прекратилось в начале 60-х годов в основном из-за представившейся возможности подключения сельских потребителей электроэнергии к государственным энергосистемам, а большинство построенных малых ГЭС затем было выведено из эксплуатации или разрушено, в основном из числа мелких мощностью до 100 кВт, принадлежавших колхозам.

В настоящее время в Республике Беларусь действует двадцать малых ГЭС, большая часть из которых восстановлена, начиная с 1992 года, из числа ранее заброшенных (около 10 МВт). В республике в 2003 году было освоено примерно 3% располагаемого экономического гидроэнергopotенциала, тогда как в соседних странах значительно больше (табл. 4.1).

Таблица 4.1

**Освоение гидроэнергоресурсов  
в Республике Беларусь и сопредельных странах**

Показатели	Страна				
	Беларусь	Литва	Польша	Украина	Россия
Экономический гидроэнергopotенциал: млрд. кВт·ч/год МВт	1,3 325	1,5 375	7 1 750	16,5 4 125	852 213 000
Общая установленная мощность действующих ГЭС, МВт	10	113	770	4731	44 700
Использование экономического гидроэнергopotенциала, %	3	30	44	115	21

Для сокращения площади затопления прилегающих к руслу реки земель представляется рациональным строительство многоступенчатых русловых каскадов малых ГЭС с гидравлически связанными подпорными бьефами. При этом достигается энергетическое использование реки на более протяженном ее участке преимущественно без вы-

хода подпорных уровней воды из берегов русла. Благоприятными для реализации таких каскадов являются участки рек с достаточным возвышением берегов русла над меженным уровнем воды в реке.

При создании каскада представляется возможность поочередного строительства его ступеней, начиная с нижележащей ГЭС на реке. Это позволяет за счет освоения мощности и выработки электроэнергии на вводимой ступени повысить экономическую эффективность каскада в сравнении с традиционной ГЭС, на которой создание напора сосредоточивается в одном створе.

Исходя из прошлого опыта строительства сельских гидроэлектростанций в Беларуси целесообразно вернуться к созданию на малых водотоках микроГЭС (мощностью менее 100 кВт) для локального электроснабжения ближайших населенных пунктов.

По утвержденной концерном «Белэнерго» от 03.05.2003 г. Программе строительства и восстановления объектов гидроэнергетики на период до 2020 года предусмотрено строительство ГЭС на основных реках Беларуси общей установленной мощностью 200 МВт и ряд малых ГЭС на их притоках мощностью каждой не менее 100 кВт с удельными затратами не более 2000 долл./кВт (табл. 4.2). Разработаны архитектурные проекты первых двух ГЭС средней мощности на Западной Двине и Немане – Полоцкой (28 МВт) и Гродненской (17 МВт).

Таблица 4.2

**Мощности ГЭС по годам**

Год	2003	2006	2009	2013	2016	2020
Установленная мощность, МВт	10,7	57,0	108,6	184,9	214,2	219,1

Оптимальным путем развития электроэнергетических систем считается создание необходимых маневренных мощностей на ГЭС или ГАЭС. При этом ГАЭС занимают особое место, поскольку являются как высокоманевренным источником пиковой мощности, так и потребителем-регулятором для заполнения ночного провала графика электрической нагрузки. В отличие от обычных ГЭС, пиковая энергоотдача ГАЭС не зависит от водности года. Строительство ГАЭС требует значительно меньших размеров отчуждения земель, чем для речных ГЭС.

Следует отметить, что наиболее маневренные среди тепловых электростанций газотурбинные установки требуют на пуск агрегата из холодного состояния 15–20 мин, тогда как время пуска гидроагрегата ГЭС или ГАЭС только 2 мин.

Создание необходимых мощностей на обычных ГЭС часто не покрывает потребности энергосистемы в маневренной мощности (до 20% от введенной мощности электростанций всех типов). Во многих странах наиболее экономически эффективные гидроэнергоресурсы либо уже использованы, либо ограничены, как и в природных условиях Беларуси. В такой ситуации наиболее приемлемый путь решения проблемы – создание ГАЭС.

Следует также отметить, что в современных условиях, а в перспективе в особенности, участие ГЭС и ГАЭС в покрытии пиковой части и заполнении провалов суточного графика нагрузок уже не является основным назначением. Они должны поддерживать постоянными уровни напряжения и частоты в электроэнергетической системе, выполнять функции резерва быстрого ввода. Это обусловлено особенностями современных промышленных технологий, требующих высокой степени надежности электроснабжения и высокого качества электроэнергии.

#### **4.2. Режимы работы и принципиальные схемы малых ГЭС**

Малые ГЭС делятся по принципу производства: для снабжения электроэнергией изолированных потребителей или подключенных к энергосистеме.

К малым ГЭС, предназначенным для работы в государственных энергосистемах, предъявляются общие требования по качеству вырабатываемой энергии и по участию в покрытии суточного графика нагрузки.

При невозможности подключения малой ГЭС к крупной энергосистеме экономически целесообразным является объединение мелких источников электроэнергии в местные энергосистемы. Создание таких энергосистем позволяет более полно использовать энергоресурсы; повысить надежность и качество энергоснабжения; снизить строительные и эксплуатационные затраты за счет концентрации подсобных предприятий и сокращения обслуживающего персонала.

Водохранилища малых ГЭС должны иметь экономически целесообразные полезные объемы с небольшой высотой сработки. При наличии водохранилища хотя бы суточного регулирования режим работы ГЭС определяется требованием получения максимальной мощности или выработки в период покрытия пика графика нагрузки энергосистемы или изолированного потребителя. С помощью суточного ре-

гулирования стока степень использования водотока в период пика может достигать 90% и более.

Режим работы малых ГЭС, сооруженных при существующих плотинах неэнергетического назначения, определяется режимом водопотребления основного потребителя (орошения, водоснабжения и т. п.). Очевидно, в большинстве случаев выработка электроэнергии такой ГЭС будет носить сезонный характер с основным производством в летние месяцы, число часов использования установленной мощности при этом не будет превышать 1500–2500 в год. Такой режим работы не всегда благоприятен для потребителей электроэнергии.

Строительство малых ГЭС является рентабельным и в том случае, если потребитель уже подключен с помощью линии электропередач к существующей энергосистеме. При дефиците воды в реке потребитель получает электроэнергию из энергосистемы, а при наличии достаточного количества воды полностью удовлетворяет свои потребности в электроэнергии за счет малой ГЭС, а излишек выработки возвращает в энергосистему.

По схеме использования водных ресурсов ГЭС делят на плотинные и деривационные. Возможно одновременное (комбинированное) использование этих сооружений в одной схеме.

**Плотинная схема** создания напора предусматривает поднятие уровня воды в реке (в верхнем бьефе) путем возведения плотины. Образуемое при этом водохранилище позволяет перераспределить сток реки во времени. При этом неизбежно некоторое затопление долины реки. В случае сооружения нескольких плотин (каскада) на том же участке реки площадь затопления уменьшается. На равнинных реках высота плотины ограничивается наибольшей экономически допустимой площадью затопления. Плотинные ГЭС строят на равнинных многоводных реках.

Плотинные ГЭС подразделяют на русловые, приплотинные и на обводном канале. У **русловой ГЭС** здание с размещенными в нем гидроагрегатами служит продолжением плотины и вместе с ней создает напорный фронт (рис. 4.2, а, б). При этом с одной стороны к зданию ГЭС примыкает верхний бьеф, а с другой – нижний бьеф. Подводящие спиральные камеры гидротурбин своими входными сечениями закладываются под уровнем верхнего бьефа, выходные же сечения отсасывающих труб погружены под уровнем нижнего бьефа. При расположении здания ГЭС в русле реки (рис. 4.2, а) оно входит в состав подпорных сооружений и воспринимает давление воды со стороны верхнего бьефа. Высота здания определяется

напором, поэтому такие компоновки ГЭС используют, как правило, при напорах до 4–6 м. Обстоятельствами, увеличивающими капиталовложения в строительство малых ГЭС с расположением здания в русле реки, являются необходимость возведения перемычек, обеспечение постоянного на время строительства водоотлива из котлована, сложность пропуска строительных расходов и перекрытия русла реки.

В состав сооружений русловой ГЭС, кроме глухой плотины, входят здание ГЭС и водосбросные сооружения (водосливная плотина, судоходный шлюз или судоподъемник, рыбопропускное сооружение, водозаборное сооружение для водоснабжения). В русловых ГЭС иногда единственным сооружением, пропускающим воду, является здание ГЭС. В этих случаях полезно используемая вода последовательно проходит входное сечение с мусорозадерживающими решетками, спиральную камеру, гидротурбину, отсасывающую трубу, а по специальным водоводам между соседними турбинными камерами производится сброс паводковых расходов реки. На крупных равнинных реках основное русло перекрывается земляной и бетонной водосливной плотиной, к которым примыкает здание ГЭС (рис. 4.2, б).

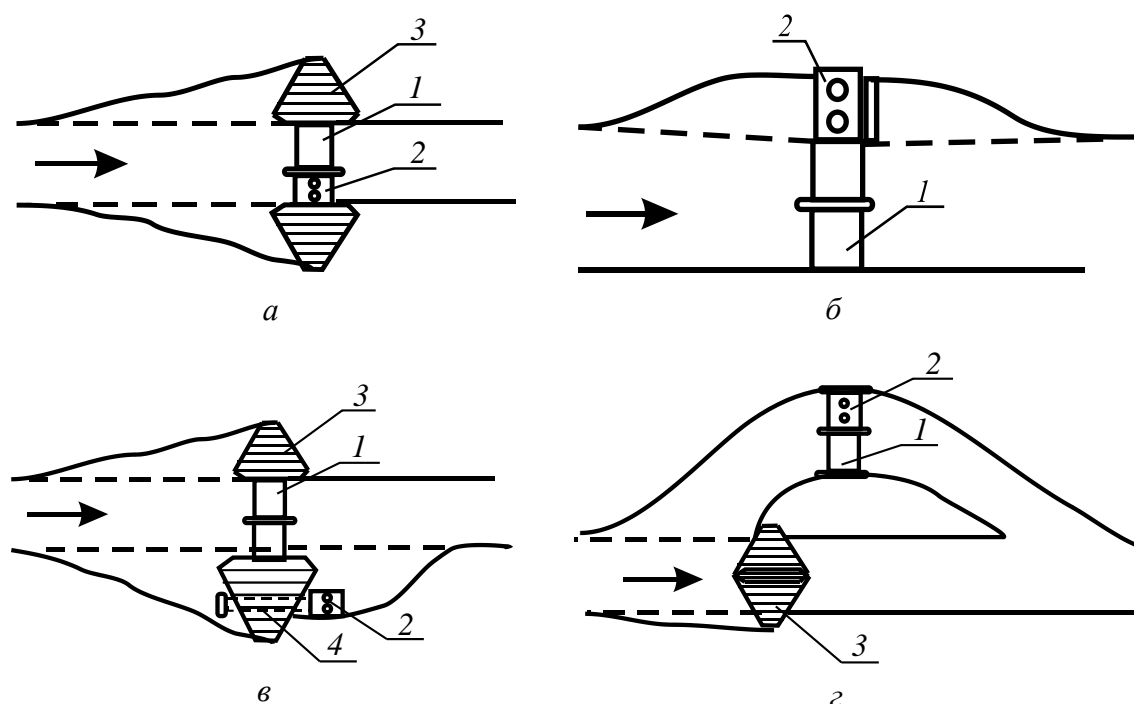


Рис. 4.2. Принципиальные схемы малых ГЭС:  
а, б – русловая; в – приплотинная; г – здание ГЭС расположено на обводном канале; 1 – водосливная плотина; 2 – здание ГЭС, 3 – глухая плотина; 4 – турбинный водовод

При более высоких напорах оказывается нецелесообразным передавать на здание ГЭС гидростатическое давление воды. В этом случае применяется тип **приплотиной ГЭС**, у которой напорный фронт на всем протяжении перекрывается плотиной, а здание ГЭС располагается за плотиной, примыкает к нижнему бьефу (рис. 4.2, в). В состав гидравлической трассы между верхним и нижним бьефом ГЭС такого типа входит глубинный водоприемник с мусорозадерживающей решеткой, турбинный водовод, спиральная камера, гидротурбина, отсасывающая труба. В качестве дополнительных сооружений в состав узла могут входить судоходные сооружения и рыбоходы, а также дополнительные водосбросы. При подводе воды к гидротурбинам по специальным напорным водоводам машинное здание не воспринимает давления воды со стороны верхнего бьефа. Подобная схема является обычной для малых ГЭС с напорами до 15–20 м.

Расположение здания ГЭС **на обводном канале**, вне русла реки (рис. 4.2, г), позволяет возводить основные сооружения (здание ГЭС, водосливную плотину) «насухо», что в значительной мере упрощает производство строительных работ, облегчает условия перекрытия русла реки и уменьшает в итоге общую стоимость гидроузла. При этом подвод воды к зданию может осуществляться напорным бассейном; трубопроводом, размещенным под телом грунтовой плотины, туннелем. Расположение здания малой ГЭС на обводном канале характерно для напоров до 6–8 м.

**Деривационная схема** позволяет получить сосредоточенный перепад путем отвода воды из естественного русла по искусственному водоводу, имеющему меньший продольный уклон. Благодаря этому уровень воды в конце водовода оказывается выше уровня воды в реке. Этой разностью уровней и создается напор ГЭС, который обычно превышает 15–20 м.

В зависимости от типа деривационного водовода различают малые ГЭС с безнапорной и напорной (рис. 4.3) деривацией.

В малых ГЭС с безнапорной деривацией вода из естественного русла отводится по безнапорным водоводам, чаще всего по открытым каналам, реже по лоткам, и безнапорными туннелями. В этом случае деривация трассируется на отметках, близких к уровню верхнего бьефа, колебания которого обычно незначительны. Открытые безнапорные деривационные водоводы применяют при относительно ровной и слабопересеченной местности, а также при достаточной устойчивости склонов речной долины. Протяженность безнапорной деривации, определяемая топографическими условиями и



технико-экономической эффективностью малой ГЭС, может достигать нескольких километров.

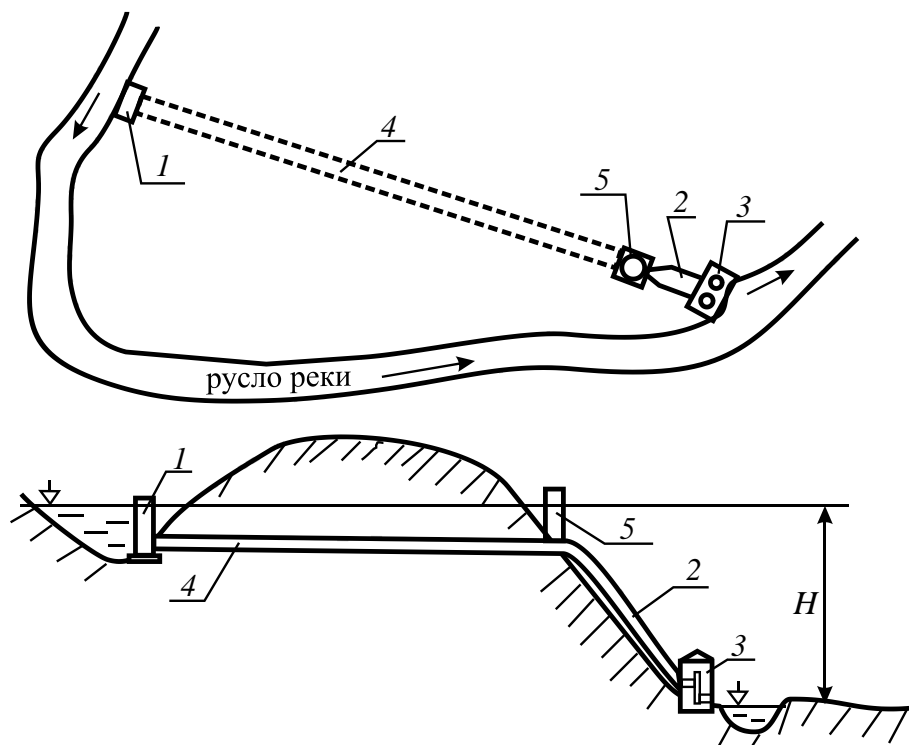


Рис. 4.3. Малая ГЭС с напорной деривацией:  
 1 – водоприемник; 2 – турбинные водоводы; 3 – здание ГЭС;  
 4 – деривационный напорный тоннель (трубопровод);  
 5 – уравнильный резервуар

В малых ГЭС с напорной деривацией обычно используют трубопроводы и гораздо реже напорные туннели. Напорные деривационные водоводы располагают на более низких по отношению к верхнему бьефу отметках, что позволяет увеличить глубину сработки и полезную емкость водохранилища. При благоприятных топографических условиях (сосредоточенном перепаде уровней воды в виде водопада, большой разности уровней в начале и конце большой излучины реки) длина деривационного водовода может быть значительно сокращена.

#### 4.3. Типы и основные энергетические параметры гидравлических турбин

Турбиной называется устройство, служащее для преобразования энергии падающей жидкости в механическую энергию. Они бывают двух типов:

– активные, рабочее колесо которых вращается в воздухе под воздействием натекающего на лопасти колеса потока воды, т. е. турбина преобразует только кинетическую энергию потока;

– реактивные, рабочее колесо которых полностью погружено в воду и вращается в основном за счет разности давления до и после колеса, т. е. турбина преобразует кинетическую и потенциальную энергию потока.

Основными параметрами, характеризующими работу турбин в установившемся режиме, являются: расход, напор, потребляемая и полезная мощность, коэффициент полезного действия.

*Расход турбины* – это количество жидкости, проходящее через турбину в единицу времени. Различают расход объемный –  $Q$  (м<sup>3</sup>/с), массовый –  $Q_m$  (кг/с), весовой –  $Q_g$  (Н/с).

*Напор турбины* – это разность полных удельных энергий потока жидкости на входном и выходном сечении турбины. Если эта энергия отнесена к единице силы тяжести (1 Дж/Н = 1 м), то это напор  $H$ , если к единице объема (1 Дж/м<sup>3</sup> = 1 Па), то это давление  $p$ . Следовательно, напором турбины называется удельная (приходящаяся на единицу веса) энергия жидкости, отданная турбине:

$$H = \left( z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right),$$

где  $z$  – геометрическая высота;  $p$  – давление;  $v$  – скорость потока, индекс «1» относится к напорному патрубку, а индекс «2» к отсасывающему патрубку.

Для реактивной турбины (пренебрегая разностью скоростных напоров  $v_1 \approx v_2$ ) напор можно определить по формуле

$$H = H_{\text{расп}} - h_{\text{пот}},$$

где  $H_{\text{расп}}$  – перепад уровней жидкости верхнего и нижнего канала (верхнего и нижнего бьефа);  $h_{\text{пот}}$  – потери напора в водоводах (рис. 4.1).

Для активной турбины напор можно определить по формуле

$$H = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}.$$

*Потребляемая мощность* – это мощность жидкости, протекающей через турбину.

$$N = \rho g Q H.$$

*Полезная мощность* – это мощность, передаваемая на вал генератора.

$$N_{\pi} = M_{\text{кр}} \omega = M_{\text{кр}} 2\pi n ,$$

где  $M_{\text{кр}}$  – крутящий момент;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $n$  – частота вращения.

Потребляемая мощность больше полезной мощности на величину потерь, которые возникают в турбине, и может быть определена через общий (полный) КПД  $N = N_{\pi} / \eta$ .

Потери мощности характеризуются объемным, гидравлическим и механическим КПД.

Объемный КПД  $\eta_o$  учитывает потери мощности в турбине вследствие утечек жидкости через зазоры между корпусом и рабочим колесом:

$$\eta_o = \frac{Q - \Delta Q_{\text{ут}}}{Q} .$$

Объемный КПД характеризует качество изготовления основных деталей турбины, в частности величину зазоров между статическими и подвижными элементами.

Гидравлический КПД  $\eta_{\text{г}}$  учитывает гидравлические потери мощности в турбине, т. е. потери на преодоление гидравлических сопротивлений в ней  $\Sigma h_{\text{тур}}$  (на трение, на вход и выход из него, на вихреобразование и т. д.):

$$\eta_{\text{г}} = \frac{H - \Sigma h_{\text{тур}}}{H} .$$

Гидравлический КПД характеризует качество поверхности элементов турбины (рабочих элементов и камер), а также динамику взаимодействий жидкости и рабочих элементов.

Механический КПД  $\eta_{\text{м}}$  учитывает механические потери мощности в турбине  $\Delta N_{\text{мех}}$  (на трение в подшипниках и уплотнениях турбины и т. д.):

$$\eta_{\text{м}} = \frac{N}{N + \Delta N_{\text{мех}}} .$$

Механический КПД характеризует качество изготовления и рациональность конструкции подшипников, сальников и других узлов, где происходит трение деталей.

Таким образом, общий КПД турбины  $\eta$  равен произведению объемного, гидравлического и механического КПД:  $\eta = \eta_o \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{м}}$ .

КПД малых турбин достигает высоких значений и при оптимальном режиме работы составляет  $\eta = 88\text{--}90\%$ , а в условиях максимальной нагрузки –  $82\text{--}85\%$ . Это обусловлено тем, что в отличие от других энергетических устройств никакие принципиальные ограничения (термодинамические или динамические) не мешают энергии падающей воды полностью превратиться в механическую энергию.

#### 4.3.1. Активные гидротурбины

К активным турбинам относятся ковшовая (турбина Пельтона) и двукратная.

Принцип работы **ковшовой турбины** основан на том, что струя воды, обладающая значительной кинетической энергией, поступает из водовода и воздействует последовательно на ковши рабочего колеса турбины (рис. 4.4). Ковш турбины имеет выступ в виде ножа, который разделяет струю и обеспечивает ее разворот на  $180^\circ$ . При этом создается давление на ковш, приводящее к вращению рабочего колеса.

Скорость струи до воздействия с ковшем обусловлена напором воды  $H$  и определяется по формуле

$$v = \sqrt{2gH_{\text{расп}}},$$

где  $H_{\text{расп}}$  – располагаемый напор, высота от свободной поверхности жидкости до оси погружения сопла (рис. 4.4).

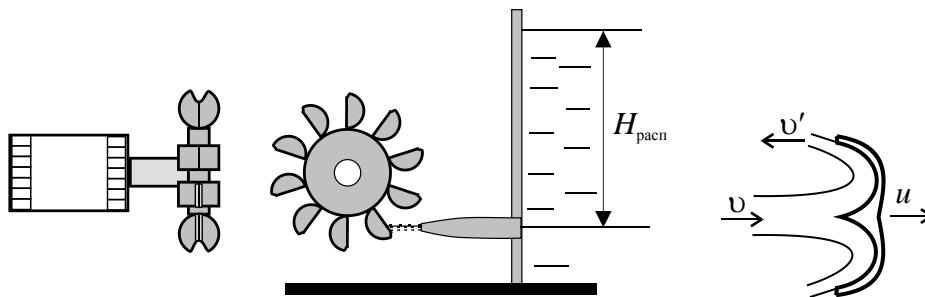


Рис. 4.4. Горизонтальный моноблочный агрегат с односопловой ковшовой турбиной

После взаимодействия с ковшем относительная скорость струи

$$v_{\text{от}} = v - u,$$

где  $u$  – скорость вращения ковша.

Если не учитывать потери на трение, то скорость струи на выходе из ковша

$$v' = u - v_{\text{от}} = u - v + u = 2u - v.$$

Тогда разность скоростей струи до и после ковша

$$\Delta v = v - v' = 2(v - u).$$

Воспользуемся законом механики об изменении количества движения: импульс внешних сил равен импульсу изменения количества движения

$$F t = \Delta v m.$$

Тогда

$$F = \Delta v m / t = 2(v - u)m / t = 2(v - u)G,$$

где  $G$  – массовый расход.

Мощность, совершаемая этой силой, определяется по формуле

$$N = F u = 2G(v - u)u.$$

Установим, при каком значении скорости движения ковша мощность турбины будет максимальной.

$$\frac{dN}{du} = 2G(v - 2u) = 0.$$

Тогда  $u = v / 2$ , а максимальная мощность  $N_{\max} = \frac{1}{2}Gv^2$ .

Расход жидкости через сопла равен

$$G = v S m \rho,$$

где  $S$  – площадь сечения сопла;  $m$  – количество сопел;  $\rho$  – плотность жидкости.

Тогда

$$N_{\max} = \frac{1}{2} \eta m S \rho (2gH)^{3/2},$$

где  $\eta$  – КПД турбины.

Конструктивные формы ковшовых турбин в значительной степени зависят от площади сечения сопла и от общего числа сопел, т. е. числа действующих струй. Увеличение числа струй приводит к соответственному увеличению мощности и частоты вращения турбины при сохранении диаметра рабочего колеса, а также предоставляет дополнительные возможности для регулирования расхода и сохранения высокого КПД при частичных нагрузках. Однако количество сопел и площадь их сечения ограничено расходом источника жидкости и размерами турбины.

В горизонтальных турбинах используют схемы с одной и двумя струями. В вертикальных турбинах, применяя охватывающий спи-

ральный водовод, легко осуществить различное количество отводов и струй, например две или четыре, а иногда и нечетное число. Ковшовые турбины малых ГЭС имеют, как правило, одно рабочее колесо.

Наиболее часто гидравлическую турбину применяют для выработки электроэнергии и присоединяют ее к генератору. Экономичнее не использовать редукторов, поэтому выбирают частоту вращения турбины  $n = \omega / (2\pi)$  равной стандартной частоте вращения генератора.

Тогда радиус размещения центра ковша рабочего колеса определяется через его линейную скорость вращения

$$R = \frac{u}{\omega} = \frac{v}{2\omega} = \frac{\sqrt{2gH_{\text{расп}}}}{4\pi n}.$$

Сопло водовода имеет круглое сечение радиусом  $r = \sqrt{S/\pi}$ , тогда

$$r = \sqrt{\frac{2N_{\text{пол max}}}{\eta \rho \pi (2gH)^{3/2}}}.$$

Определяющим параметром ковшовой турбины является отношение радиуса сопла к радиусу турбины. На практике используются колеса с размерами лопасти  $r/R = 1/12$ , так как при больших размерах лопасти ухудшаются условия их обтекания.

Регулирование расхода воды ковшовой турбиной осуществляется при простом регулировании с помощью оборудованного игольчатым затвором сопла, а при двойном – соплом и дефлектором (отклонителем струи).

Ковшовые турбины применяют для напоров 80–1200 м, что с учетом изменения расхода воды в схемах малых ГЭС в пределах 0,02–5 м<sup>3</sup>/с обеспечивает единичную мощность агрегатов 50–10 000 кВт. Активные гидротурбины, в частности ковшовые, можно достаточно эффективно использовать и при относительно небольших напорах 20–80 м, особенно когда содержащиеся в воде твердые частицы приводят к быстрому износу элементов проточной части.

Ремонтировать и заменять детали у ковшовых турбин гораздо проще, чем в реактивных турбинах. Однако лопасти у ковшовых турбин работают в очень тяжелых условиях. В отличие от реактивных турбин, у которых нагрузка, воспринимаемая лопастями рабочего колеса, от потока в процессе вращения практически не меняется, в ковшовых турбинах лопасть нагружается максимальной силой от давления воды только тогда, когда она проходит через струю, а затем нагрузка снимается. Таким образом, лопасти рабо-

тают в условиях переменной нагрузки, которая вызывает усталостные явления в металле и способствует расшатыванию, расслаблению крепления.

**Двукратные турбины** (турбины Банки – Митчела) относятся к виду свободноструйных турбин. Конструкция их довольно проста (рис. 4.5). Во время работы колесо турбины заполнено водой неполностью. Поток, поступающий из подводящего устройства,

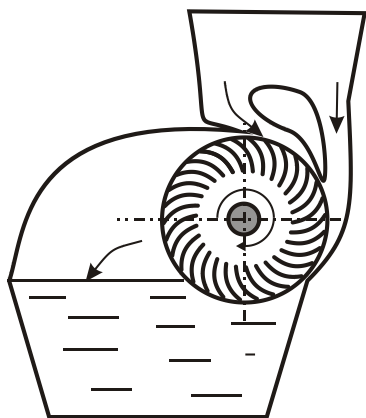


Рис. 4.5. Двукратная турбина

падает на рабочее колесо и, протекая от периферии к центру, отдает около 70–80% полезной энергии. Лопасти колеса имеют такую форму, что при сходе поток обладает еще значительной кинетической энергией. Двигаясь внутри колеса, он вновь попадает на лопасти изнутри и при центробежном течении отдает еще около 20–30% энергии. Таким образом струя воды проходит через лопастную решетку рабочего колеса 2 раза. Поскольку двукратная турбина является активной, ее можно использовать для широкого диапазона напора.

КПД двукратной турбины в широком диапазоне изменения расхода достаточно высок. Максимальный КПД у крупных агрегатов достигает 84–88%. Турбина обладает очень пологой характеристикой. Это дает существенное преимущество для малых гидроэнергетических установок, у которых может в течение нескольких месяцев сильно уменьшаться сток реки.

Двукратные турбины обладают рядом положительных качеств: конструктивная и технологическая простота делает турбину относительно дешевой и высокий КПД (выше 80% находится в широком диапазоне расходов; полная автоматизация и простота обслуживания; гарантируемый срок надежной работы около 30–40 лет. Все это позволяет считать двукратные турбины конкурентоспособными по отношению к турбинам других типов.

#### 4.3.2. Реактивные гидротурбины

В отличие от активной турбины, где струя воздействует на лопасти периодически, в реактивной турбине жидкость воздействует на лопасти постоянно. По виду рабочего колеса реактивные турбины делятся на осевые (напор до 30 м), диагональные (напор от 40 до 200 м), радиально-осевые (напор от 80 до 700 м).

Основными элементами реактивной турбины являются рабочее колесо 1, статор турбины 2, направляющий аппарат 3, отсасывающая труба 4 (рис. 4.6).

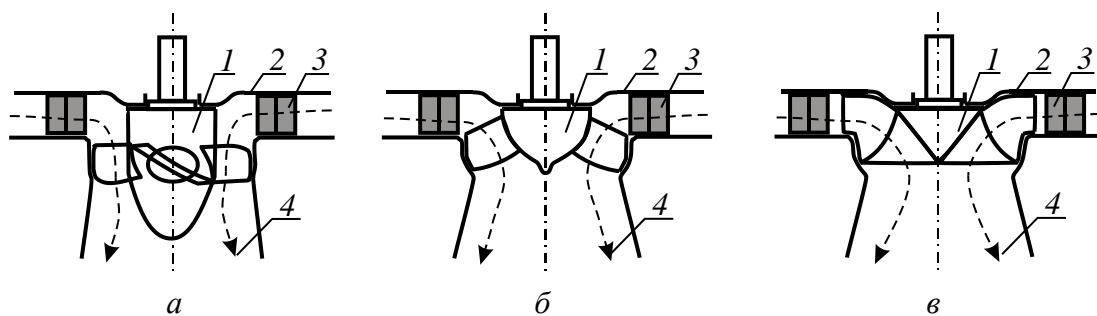


Рис. 4.6. Различные виды реактивных турбин:  
а – осевая; б – диагональная; в – радиально-осевая

Статор турбины представляет собой ряд колонн с вытянутой обтекаемой формой поперечного сечения. Основное назначение статора – воспринимать нагрузки, вызываемые весом устройств и давлением воды.

Направляющий аппарат состоит из направляющих управляемых лопаток. Направляющий аппарат создает необходимое давление потока перед рабочим колесом, а также с его помощью осуществляется регулирование пропускаемой турбиной расхода жидкости.

Рабочее колесо предназначено для восприятия силового воздействия притекающего потока жидкости. Основным элементом рабочего колеса являются лопасти и втулка, на которой крепятся лопасти. Особенностью рабочих колес некоторых турбин является возможность на рабочем ходу поворачивать лопасти рабочего колеса (изменять угол установки лопастей). Угол установки лопастей изменяется в зависимости от открытия направляющего аппарата и от действующего напора таким образом, чтоб достичь максимального значения КПД турбины. Это дает большие энергетические преимущества, но в то же время приводит к значительному усложнению конструкции.

Отсасывающая труба представляет собой расширяющийся диффузорный водовод, по которому вода от рабочего колеса отводится в нижний канал. Отсасывающие трубы делятся на прямоосные (конические, раструбные, с переходом) и изогнутые. Уменьшение скорости воды по длине отсасывающей трубы позволяет повысить КПД и мощность турбины.

Коэффициент полезного действия, или коэффициент восстановления отсасывающей трубы, определяется отношением



$$\eta_{\text{отс}} = \frac{v_2^2 - v_3^2 - 2g \sum h}{v_2^2},$$

где  $v_2$  – скорость потока после турбинного колеса;  $v_3$  – скорость потока в выходном сечении отсасывающей трубы;  $\sum h_{\text{отс}}$  – суммарные потери напора в отсасывающей трубе.

Потери в отсасывающей трубе определяются двумя факторами: трением о стенки, которое имеет сравнительно малое значение, и вихревыми потерями, вызываемыми диффузорностью отсасывающей трубы. Для обеспечения безотрывного движения, при котором потери напора минимальны, угол конусности в отсасывающей трубе устанавливается не более 12–14°. Для отсасывающих труб достаточно большой длины значение КПД достигает 80–85%.

Осевые турбины на малых ГЭС применяют для напоров 1–30 м. С учетом принятого в настоящей работе максимального значения  $D = 2,8$  м расход осевых турбин может достигать 75 м³/с, а мощность агрегата даже при небольших напорах 5000 кВт.

Конструктивное исполнение осевых турбин определяется многими факторами, к числу которых прежде всего относятся: компоновка агрегата, форма подвода и тип отсасывающей трубы. Компоновка агрегата бывает вертикальная, горизонтальная и наклонная.

В диапазоне напоров до 6 м широко применяют классические вертикальные турбины, устанавливаемые в открытых турбинных камерах. В качестве примера на рис. 4.7 изображена конструкция стандартной «трубной» осевой турбины с кожуховым фронтальным подводом воды к рабочему колесу турбин, широко применяемой при напорах 10–30 м. Вода к кожуховой турбинной камере подводится по напорному трубопроводу, заканчивающемуся дисковым затвором. В пределах камеры происходит изменение направления потока с горизонтального на вертикальное. Для уменьшения гидравлических потерь при повороте потока камера имеет увеличенное по сравнению с трубопроводом поперечное сечение, и внутри ее установлена струенаправляющая профилированная решетка. Турбина имеет конический направляющий аппарат. От рабочего колеса вода отводится по изогнутой отсасывающей трубе.

Вертикальные компоновки агрегатов обеспечивает равномерное воздействие жидкости на все лопасти рабочего колеса, позволяет напрямую (без мультипликатора) вывести генератор на верхние этажи здания ГЭС и тем самым упростить здание, уменьшить его габаритные размеры и снизить стоимость.

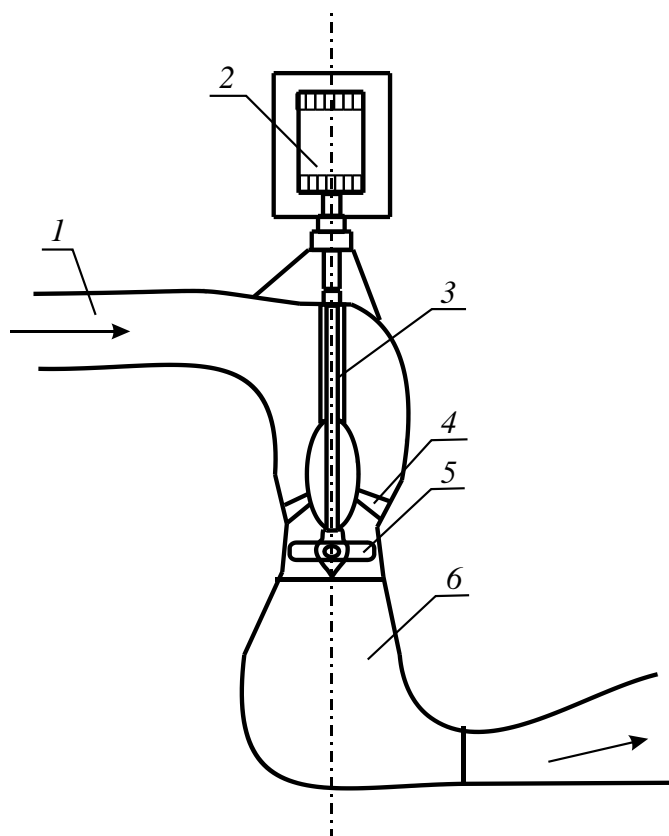


Рис. 4.7. Вертикальная осевая турбина  
с кожуховым подводом воды к рабочему колесу:  
1 – напорный трубопровод; 2 – генератор;  
3 – вал; 4 – направляющий аппарат;  
5 – рабочее колесо; 6 – отсасывающая труба

Эффективными в низконапорных малых ГЭС являются горизонтальные турбины, разнообразные конструкции которых были разработаны сравнительно недавно и получили широкое распространение.

На рис. 4.8 изображена горизонтальная турбина с отсасывающей трубой характерной S-образной формы, дающей возможность вывести горизонтальный вал турбины в помещение, в котором размещается генератор. Главной особенностью этих турбин является практически прямоосное движение воды через проточный тракт, что дает возможность упростить конструкцию здания ГЭС, уменьшить расстояние между агрегатами и резко сократить объемы строительных работ. Минимальные повороты и прямоосное движение воды обеспечивают, кроме того, снижение гидравлических потерь, увеличение пропускной способности и повышение КПД турбины, особенно при больших расходах. В результате такие турбины развивают на 10–15% большую мощность, чем вертикальные того же размера.

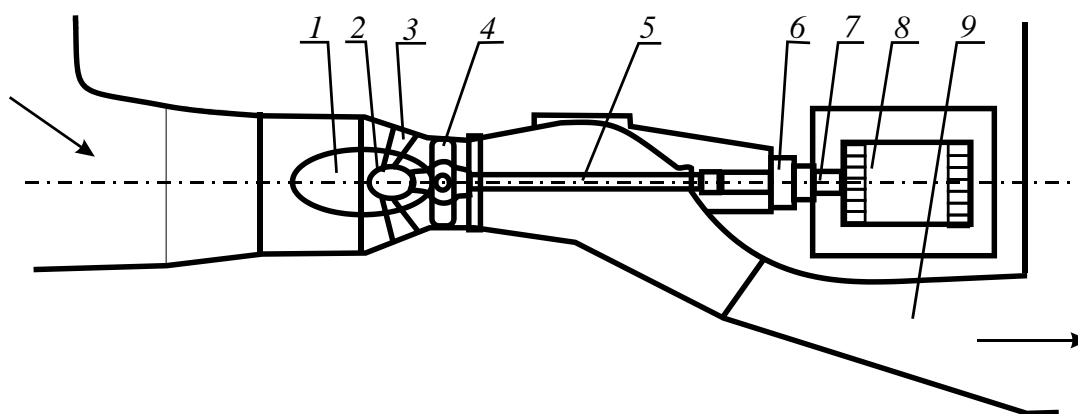


Рис. 4.8. Горизонтальная «трубная» осевая турбина с S-образной отсасывающей трубой:  
 1 – капсула; 2 – подшипник; 3 – направляющий аппарат;  
 4 – рабочее колесо; 5 – вал; 6 – мультипликатор; 7 – муфта;  
 8 – генератор; 9 – отсасывающая труба

Для уменьшения габаритной ширины и улучшения доступа к электрической части агрегата генератор можно расположить вертикально, подсоединив его к валу турбины через мультипликатор (рис. 4.9). Возможна и наклонная компоновка агрегата. В этом случае поток поворачивает на 40–60°.

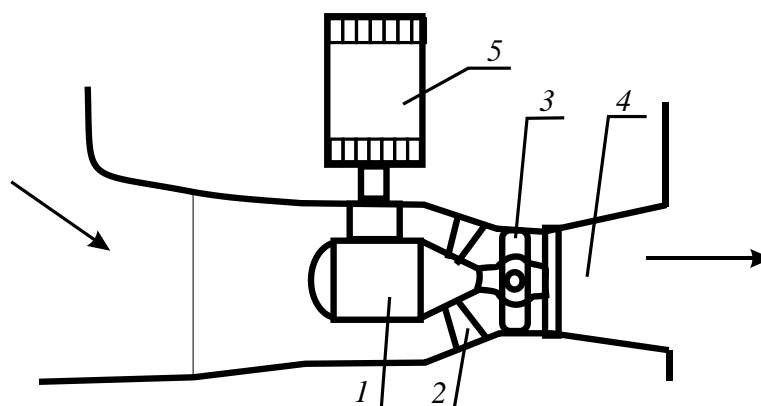


Рис. 4.9. Горизонтальная турбина с мультипликатором и вертикальным расположением генератора:  
 1 – капсула мультипликатора; 2 – направляющий аппарат;  
 3 – рабочее колесо; 4 – отсасывающая труба; 5 – генератор

В горизонтальных агрегатах отсутствует осевая сила, вызванная массой вращающихся частей, благодаря чему имеется возможность использования стандартных серийно выпускаемых генераторов. Недостатком горизонтальных компоновок является повышенная высота отсасывания, появляющаяся в тех случаях, когда генератор необходимо разместить выше максимального уровня воды в нижнем бьефе.

#### 4.3.3. Основное энергетическое уравнение турбины

Для получения основного уравнения турбины воспользуемся упрощенной схемой движения жидкости в рабочем колесе. Будем считать, что оно имеет бесконечно большое количество лопаток и поток жидкости равномерно распределен по бесконечно малым каналам между лопатками. Такое движение по отдельному бесконечно малому каналу можно рассматривать как движение элементарной струйки.

Абсолютную скорость  $\vec{v}$  движения частиц жидкости между лопатками можно определить как векторную сумму ее составляющих (рис. 4.10):

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{w},$$

где  $\vec{u}$  – **окружная скорость, или скорость переносного движения**, т. е. скорость, с которой жидкость вращается вместе с рабочим колесом (направлена по касательной к окружности в сторону вращения  $u = \omega r$ ),  $\vec{w}$  – **относительная скорость**, т. е. скорость движения частиц жидкости относительно лопаток рабочего колеса (направлена по касательной к лопатке рабочего колеса от центра к окружности).

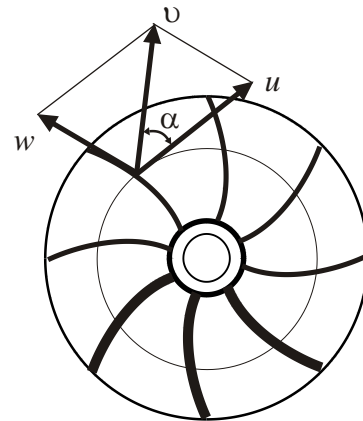


Рис. 4.10. Схема лопастного колеса

Согласно уравнению Бернулли, рассматривая сечения потока жидкости на входе 1–1 и на выходе 2–2 канала между лопатками (рис. 4.10), определим теоретический напор турбины при бесконечно большом числе лопаток:

$$H_{\text{т.т.}} = \left( \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right).$$

Для вывода формулы применим к элементарному объему струйки теорему равенства энергий: изменение энергий сил давления и кинетических энергий от сечения 1–1 к сечению 2–2 равно удельной энергии центробежных сил колеса  $E_{\text{ц.с.}}$ :

$$\left( \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} \right) + \left( \frac{w_1^2}{2g} - \frac{w_2^2}{2g} \right) = E_{\text{ц.с.}}$$

Тогда, подставляя данное выражение в уравнение для определения теоретического напора турбины, получим

$$H_{\text{т.о.}} = \left( \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) + \left( \frac{w_2^2}{2g} - \frac{w_1^2}{2g} \right) + E_{\text{ц.с.}}$$

Определим удельную энергию центробежных сил колеса. Центробежная сила, действующая на вращающуюся жидкость,

$$F_{\text{ц}} = m\omega^2 r = mu^2 / r,$$

где  $\omega = u / r$  – угловая скорость вращения.

Тогда удельная энергия центробежных сил при перемещении жидкости на расстояние  $dr$  равна

$$dE_{\text{ц.с.}} = \frac{F_{\text{ц}}}{mg} dr = \frac{m\omega^2 r}{mg} dr = \frac{\omega^2}{g} r dr.$$

Проинтегрируем данное выражение в пределах от радиуса внутренней окружности рабочего колеса  $r_2$  до радиуса наружной окружности рабочего колеса  $r_1$ :

$$E_{\text{ц.с.}} = \int_{r_2}^{r_1} dE_{\text{ц.с.}} = \int_{r_2}^{r_1} \frac{\omega^2}{g} r dr = \frac{\omega^2 (r_1^2 - r_2^2)}{2g} = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g}.$$

Тогда, подставляя данное выражение в уравнение для определения теоретического напора турбины, получим

$$H_{\text{т.о.}} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g}.$$

Из параллелограмма скоростей получим

$$w^2 = v^2 + u^2 - 2vu \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между направлениями абсолютной и переменной скоростей.

Подставив данное выражение в уравнение для теоретического напора, получим основное энергетическое уравнение турбины (уравнение Эйлера):

$$H_{\text{т.о.}} = \frac{v_1 u_1 \cos \alpha_1 - v_2 u_2 \cos \alpha_2}{g}.$$

Данное уравнение определяет связь между теоретическим напором и кинематическими показателями потока жидкости, протекающей через рабочее колесо. Действителен напор всегда больше теоретического напора из-за конечного числа лопаток и потерь напора на преодоление гидравлических сопротивлений при движении жидкости в самой турбине:

$$H = \frac{v_1 u_1 \cos \alpha_1 - v_2 u_2 \cos \alpha_2}{g \eta_r K},$$

где  $\eta_r$  – гидравлический КПД;  $K = \left(1 + \frac{2\psi}{z} \left(1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}\right)\right)^{-1}$  – коэффициент, учитывающий влияние конечного числа лопаток,  $\psi$  – коэффициент, учитывающий шероховатость рабочей части турбины,  $r_1$  и  $r_2$  – радиус лопастей на входе и выходе в рабочее колесо турбины,  $z$  – количество лопастей рабочего колеса.

У осевых турбин поверхность тока в рабочем колесе близка к цилиндрической и, следовательно,  $u_1 = u_2 = u$ . Тогда действительный напор рабочего колеса

$$H = \frac{u(v_1 \cos \alpha_1 - v_2 \cos \alpha_2)}{g \eta_r K}.$$

Расход жидкости через турбину равен расходу через направляющий аппарат:

$$Q_K = v_0 \pi D_0 b_0,$$

где  $D_0$  – внешний диаметр направляющего аппарата;  $b_0$  – высота лопаток направляющего аппарата.

Это выражение приближенное, так как не учитывает количество лопаток  $z$  направляющего аппарата и их толщину  $\delta$ , а также утечки жидкости. С учетом этих факторов

$$Q = (\pi D_0 - \delta z) b_0 v_0 \eta_0 \psi \pi D b v \eta,$$

где  $\psi = 1 - \frac{\delta z}{\pi D_0}$ ;  $\eta_0$  – объемный КПД.

#### 4.3.4. Теория подобия лопастных турбин

Различные группы турбин могут быть объединены по принципу их геометрического подобия.

*Геометрическое подобие* рабочих колес предполагает пропорциональность всех аналогичных размеров их проточной части ( $b$ ,  $D$ ,  $r$ ), равенство углов, определяющих форму лопаток ( $\beta$ ), и одинаковое число всех лопаток  $z$ :

$$\frac{D_H}{D_M} = \frac{b_H}{b_M} = \frac{\delta_H}{\delta_M} = \text{const}, \quad \alpha_H = \alpha_M, \quad \beta_H = \beta_M.$$

Здесь и далее индекс «н» относится к натурному колесу, а «м» – к модельному.

*Кинематическое подобие* заключается в подобии параллелограммов скоростей, построенных для аналогичных точек натурального и модельного колес.

$$\frac{u_n}{u_m} = \frac{w_n}{w_m} = \frac{v_m}{v_n} = \text{const}.$$

Для *динамического подобия* требуется равенство чисел Рейнольдса  $Re_n = Re_m$ . Так как в большинстве случаев турбины работают в режиме автомодельности, то они всегда динамически подобны. Следовательно, для полного подобия турбины достаточно наличие лишь геометрического и кинематического подобий. При таком условии  $\eta_{он} \approx \eta_o$ ,  $\eta_{мн} \approx \eta_{гм}$ ,  $\eta_n \approx \eta_m$ .

Соотношение расходов подобных турбин получим из уравнения расхода жидкости через каналы рабочего колеса и условия геометрического подобия:

$$\frac{Q_n}{Q_m} = \frac{\psi \pi D_n b_n v_n}{\psi \pi D_m b_m v_m} = \frac{D_n^2 v_n}{D_m^2 v_m}.$$

На основании вышеприведенной формулы для относительной скорости можно получить следующее выражение:

$$\frac{u_n}{u_m} = \frac{\pi D_n n_n}{\pi D_m n_m} = \frac{D_n n_n}{D_m n_m}.$$

Используя условие кинематического подобия, получим следующее соотношение расходов подобных турбин:

$$\frac{Q_n}{Q_m} = \frac{n_n D_m^3}{n_m D_n^3}.$$

Соотношение напоров найдем из уравнения Эйлера:

$$\frac{H_n}{H_m} = \left( \frac{v_n u_n \cos \alpha}{g} \right) / \left( \frac{v_m u_m \cos \alpha}{g} \right) = \frac{u_n^2}{u_m^2}.$$

Используя полученное ранее соотношение относительных скоростей, получим итоговое соотношение напоров для подобных турбин:

$$\frac{H_n}{H_m} = \frac{n_n^2 D_n^2}{n_m^2 D_m^2}.$$

Соотношение мощностей подобных турбин имеет вид

$$\frac{N_H}{N_M} = \frac{\rho g Q_H H_H}{\rho g Q_M H_M} = \frac{Q_H H_H}{Q_M H_M}.$$

Тогда, используя ранее полученные соотношения расходов и напоров, получим итоговое соотношение мощностей подобных турбин:

$$\frac{N_H}{N_M} = \frac{n_H^3 D_H^5}{n_M^3 D_M^5}.$$

Если рассматривать режимы одной и той же турбины, то при разных частотах вращения  $n_1$  и  $n_2$  законы подобия запишутся в следующем виде:

$$\frac{Q_H}{Q_M} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_H}{H_M} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2; \quad \frac{N_H}{N_M} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3.$$

Имея параметры при частоте  $n_1$ , можно рассчитать характеристики турбины для любой частоты вращения.

Для сравнительной оценки различных типов турбины объединяют в серии по типу геометрического подобия рабочих колес. В качестве эталонной турбины выбрана турбина, которая развивает напор  $H_s = 1$  м и дает производительность  $Q_s = 0,075$  м<sup>3</sup>/с. Частота вращения эталонной турбины  $n_s$  при данных условиях называется **коэффициентом быстроходности**.

Используя уравнение подобия, получим уравнение для расчета коэффициента быстроходности:

$$n_s = n \left( \frac{Q}{Q_s} \right)^{1/2} \left( \frac{H_s}{H} \right)^{3/4} = \frac{3,65 n Q^{1/2}}{H^{3/4}}.$$

Коэффициент быстроходности определяется для режима максимальной мощности. Он имеет следующие значения для различных типов турбин: осевых —  $n_s = 1000 - 450$  об/мин, диагональных —  $n_s = 500 - 250$  об/мин, радиально-осевых  $n_s = 300 - 80$  об/мин, ковшовых —  $n_s = 50 - 10$  об/мин.

#### 4.3.5. Эксплуатация турбин

Гидравлические турбины являются простыми в эксплуатации и весьма надежными машинами. Однако в некоторых случаях может возникать износ турбины, приводящий к снижению ее КПД, к усилению вибрации и шума. Износ турбины делится на кавитационный и абразивный.



**Кавитационный износ** – это износ, вызванный возникновением кавитации у осевых и радиально-осевых турбин на тыльной («вакуумной») стороне лопастей рабочего колеса. Интенсивность кавитационного износа иногда весьма высока и достигает по глубине 5–10 мм/год. Условие безкавитационной работы турбины ограничивает допустимую высоту отсасывания:

$$H_s^{\text{доп}} \leq \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{н.п}}}{\rho g} - \sigma_t H,$$

где  $p_{\text{атм}}$  – атмосферное давление на поверхности нижнего бьефа;  $p_{\text{н.п}}$  – абсолютное давление насыщенных паров перекачиваемой жидкости, принимаемое в зависимости от температуры жидкости по справочникам;  $\sigma_t$  – коэффициент кавитации турбинной установки, который устанавливается экспериментально, но приближенно его можно определить по формуле

$$\sigma_t = \frac{(n_s + 30)^{1.8}}{200\,000}.$$

Если значение допустимой высоты отсасывания получилось отрицательным, то, следовательно, турбину придется установить так, чтобы она была заглублена под уровень нижнего бьефа. Это, соответственно, приведет к увеличению затрат на строительство здания ГЭС.

**Абразивный износ** – это износ, вызванный воздействием частиц (особенно кварцевых), содержащихся в воде. Интенсивность абразивного износа зависит от кинетической энергии частиц  $E = \rho V v^2 / 2$  и их форм (округлые или обладающие острыми кромками).

#### 4.3.6. Выбор типа турбины

На малых ГЭС используют практически все известные в настоящее время виды турбин. Осевые – поворотно-лопастные и пропеллерные турбины применяют при низких напорах – до 25 м. В широкой области напоров 2–800 м можно использовать радиально-осевые турбины. Ковшовые турбины используют при напорах 60–1000 м.

Таким образом, области применения гидротурбин малой мощности различных видов перекрываются весьма существенно. Так, при напорах 2–25 м могут быть приняты как осевые, так и радиально-осевые турбины, а при напорах свыше 60 м – турбины двух классов: реактивные (радиально-осевые) и активные (ковшовые). Оптимальное решение выбирают на основании технико-экономического сопоставления воз-

можных вариантов. При этом решающее значение имеют рабочие характеристики, кавитационные показатели и стоимость турбин.

Эффективность использования осевых турбин на малых ГЭС при переменных расходах и напорах определяется их способностью к регулированию мощности. Осевая турбина с жестко закрепленными лопастями рабочего колеса и лопатками направляющего аппарата имеет очень узкую зону с высоким КПД (кривая 1 на рис. 4.11). Применение таких турбин ограничено редко встречающимися на практике условиями постоянства расхода и напора. Наличие поворотного направляющего аппарата у осевой турбины с фиксированными лопастями рабочего колеса (кривая 2) позволяет осуществлять некоторое регулирование мощности. Более благоприятную и пологую характеристику с большим КПД в широком диапазоне изменения мощности имеет осевая турбина с поворотными лопастями рабочего колеса и неподвижными лопатками направляющего аппарата (кривая 3). Максимальные возможности регулирования мощности представляет осевая поворотно-лопастная турбина с поворотным направляющим аппаратом (кривая 4).

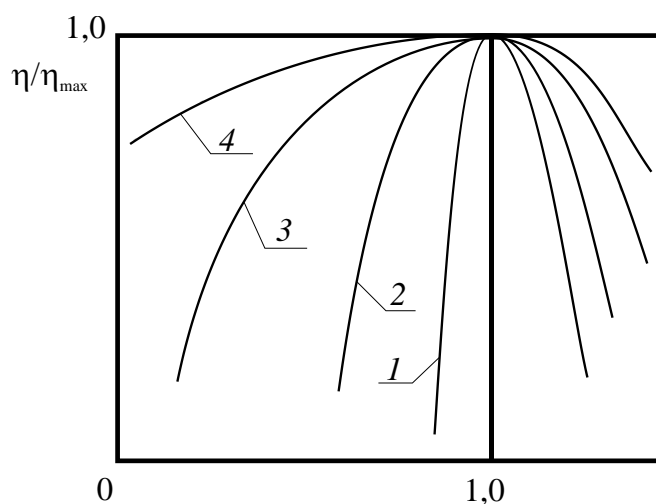


Рис. 4.11. Относительные мощностные характеристики осевых турбин с различными способами регулирования мощности

Сравнительные рабочие характеристики основных видов турбин показаны на рис. 4.12. Из их рассмотрения следует, что в условиях меняющейся нагрузки весьма эффективными являются активные ковшовые и осевые поворотно-лопастные турбины, сохраняющие высокий КПД в широком диапазоне изменения расхода. Радиально-осевые турбины обладают гораздо худшей способностью к регулированию. Осевые пропеллерные турбины, КПД которых приближается к

нулю при расходах около 30–45% от расчетного, можно эффективно применять лишь при очень небольшом колебании расхода.

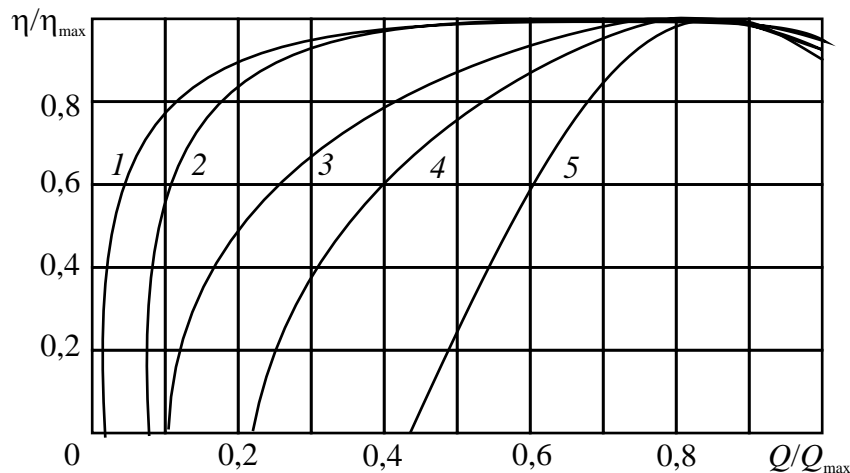


Рис. 4.12. Относительные расходные характеристики турбин различных видов:

1 – ковшовая; 2 – осевая поворотнo-лопастная; 3 – радиально-осевая; 4 – осевая пропеллерная ( $n_s = 450$ ); 5 – осевая пропеллерная ( $n_s = 800$ )

Стоимость турбин малых ГЭС тем больше, чем больше их размеры и масса или в итоге мощность. Если же рассматривать удельную стоимость турбин, то она различна для турбин разных видов, а в пределах одного вида резко уменьшается с увеличением напора, что хорошо иллюстрируется номограммой, изображенной на рис. 4.13.

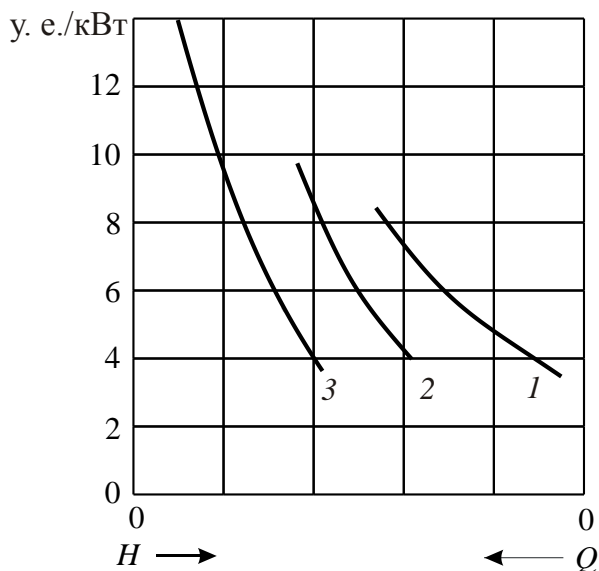


Рис. 4.13. Удельная стоимость турбин различных типов:

1 – ковшовая; 2 – радиально-осевая;  
3 – осевая поворотнo-лопастная

На рис. 4.13 также показана разная удельная стоимость ковшовых, радиально-осевых и осевых турбин при одинаковом напоре.

## 4.4. Гидравлический таран

### 4.4.1. Явление гидравлического удара

В 1898 году русский ученый Николай Егорович Жуковский, анализируя причины аварий на московском водопроводе, открыл явление гидравлического удара и разработал теорию этого явления.

**Гидравлическим ударом** называется резкое изменение давления жидкости при резком изменении скорости потока. Он наблюдается при быстром закрытии запорных устройств, установленных на трубопроводах (кранов, задвижек, клапанов), быстром останове или пуске гидродвигателя или насоса. При гидравлическом ударе происходит переход кинетической энергии движущейся жидкости в потенциальную энергию покоящейся жидкости. Однако такой переход не мгновенный, а протекает с определенной скоростью, зависящей от свойств жидкости и материала трубопровода. Кроме того, этот процесс носит волновой характер. Покажем на простом примере стадии распространения гидравлического удара.

Резервуар соединен с трубопроводом длиной  $l$ , на конце трубопровода установлена задвижка (рис. 4.14). Размеры резервуара таковы, что при отборе жидкости из него уровень жидкости в резервуаре практически не понижается. Также для упрощения модели пока будем считать саму трубу недеформируемой. Примем за начало отсчета точку  $O$ , расположенную на оси трубы в плоскости задвижки.

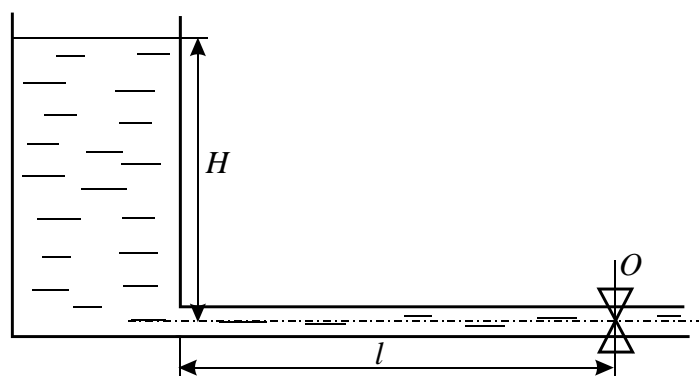


Рис. 4.14. Схема установки для исследования гидравлического удара

Если бы жидкость была несжимаемой, то при резком закрытии задвижки мгновенно остановилась бы вся масса жидкости, находя-

щаяся в трубе, что вызвало бы мгновенный рост давления во всей жидкости. На самом деле в упругой жидкости процесс будет развиваться иначе. В момент резкого закрытия задвижки остановится только тонкий слой жидкости, непосредственно примыкающий к задвижке, остальная масса жидкости будет продолжать движение. За бесконечно малый промежуток времени (длительность процесса остановки) остановится масса жидкости в объеме первого тонкого слоя толщиной  $dh$ .

$$dm = \rho S dh,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $S$  – площадь внутреннего сечения трубы;  $dh$  – тонкого слоя жидкости.

Если обозначить давление в точке  $O$  до закрытия затвора через  $p_0$ , а через  $p_0 + \Delta p$  давление после мгновенного закрытия задвижки, то по теореме об изменении количества движения можно вычислить изменение давления  $\Delta p$ :

$$\Delta F dt = \Delta v dm;$$

$$S \Delta p dt = \rho \Delta v S dh.$$

Тогда

$$\Delta p = \rho \Delta v c,$$

где  $\Delta v$  – изменение скорости движения жидкости,  $c = dh / dt$ .

Затем в следующий момент времени остановится следующий слой жидкости, потом третий и т. д. Так постепенно увеличенное давление у задвижки распространится по всему трубопроводу в направлении против течения жидкости. Тогда величина  $c = dh / dt$  представляет собой скорость распространения упругой (ударной) волны.

Величина скорости распространения ударной волны определяется по формуле Н. Е. Жуковского:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_{\text{ж}}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{ж}}}{E} \cdot \frac{d}{\delta}}},$$

где  $E_{\text{ж}}$  и  $E$  – соответственно объемный модуль упругости жидкости и материала трубопровода;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода;  $\delta$  – толщина стенок трубы.

По истечении времени  $l / c$  вся жидкость в трубопроводе будет находиться в сжатом состоянии. Но тогда возникает перепад давления между жидкостью в резервуаре и жидкостью в трубе, в результате чего начнется движение упругой жидкости из трубопровода обратно в

резервуар. По истечении такого же временного интервала  $l/c$  давление жидкости у задвижки понизится на величину  $\Delta p$ , т. е. достигнет первоначального значения. При этом процесс движения жидкости в резервуар будет продолжаться, пока пониженное давление не распространится до конца трубопровода (до резервуара).

Затем из-за инерции движения жидкости произойдет понижение давления жидкости на величину  $\Delta p$ , т. е. давление около задвижки станет меньше начального:  $p_0 - \Delta p$ .

Таким образом, давление у задвижки будет сохраняться на постоянном уровне в течение времени  $2l/c$ , а продолжительность всего цикла гидравлического удара будет равна  $4l/c$ . За это время давление у задвижки в течение половины этого времени будет максимальным  $p_0 + \Delta p$ , в течение другой половины времени – минимальным:  $p_0 - \Delta p$ .

Затем цикл начнется заново. Если бы не было потерь давления на трение и деформирования трубопровода, то циклы повторялись бы бесконечно долго и гидравлический удар был бы постоянной величиной. Справа от задвижки также возникает гидравлический удар, только он начинается с понижения давления.

Резкое увеличение давления, сопровождающее гидравлический удар, – явление крайне негативное, так как гидравлический удар может разрушить трубопровод или какие-либо элементы гидравлических машин, испытывающие эффекты гидравлического удара. По этой причине разрабатываются методы предотвращения гидравлических ударов или уменьшения его негативного влияния.

1. Поскольку мощность гидравлического удара напрямую зависит от массы движущейся жидкости, то для предотвращения гидравлического удара следует максимально уменьшить массу жидкости, которая будет участвовать в гидравлическом ударе. Для этого необходимо запорную арматуру монтировать в непосредственной близости к резервуару.

2. В качестве меры уменьшения негативных последствий гидравлического удара используют замену прямого гидравлического удара на не прямой. Для этого достаточно запорную арматуру на напорных трубопроводах сделать медленно закрывающейся:  $t_{\text{закр}} > 2L/c$ , что

позволит уменьшить силу удара  $\Delta p' = \frac{2L}{ct_{\text{закр}}} \Delta p$ .

3. Другой мерой борьбы с явлением гидравлического удара является установка на напорных линиях, работающих в условиях циклической нагрузки, специальных компенсаторов с воздушной подушкой или предохранительных клапанов, которые принимают на себя удар.

Однако в ряде случаев явление гидравлического удара успешно используется. К таким случаям использования гидравлического удара относятся производственные процессы по разрушению материалов и др. Известна специальная конструкция водоподъемника, базирующаяся на использовании гидравлического удара.

### Конструкция и принцип действия гидравлического тарана

Гидравлический таран – это механизм, преобразующий энергию потока в потенциальную энергию давления, которую использует для поднятия жидкости на высоту нескольких десятков метров. Он может месяцами непрерывно работать без присмотра, регулировки и обслуживания, снабжая водой небольшой поселок или ферму.

Гидравлический таран работает следующим образом (рис. 4.15). Из питательного резервуара 1 вода по питательной трубе 2 поступает внутрь гидравлического тарана 3 и вытекает через ударный клапан 4.

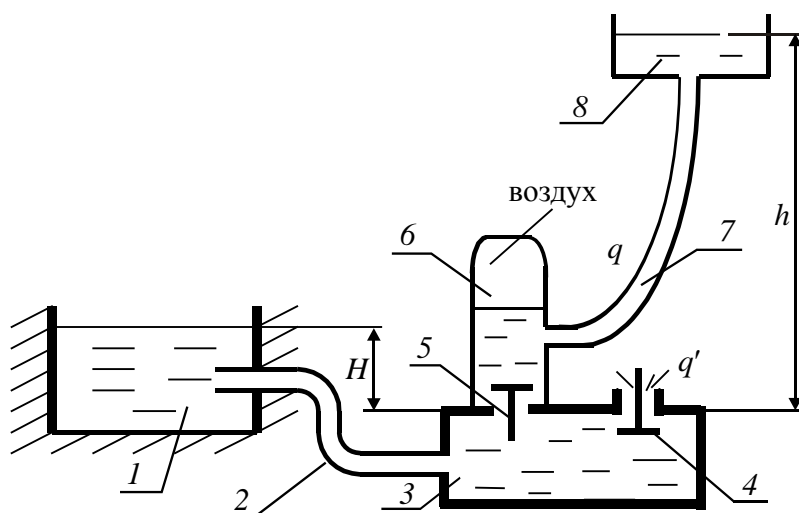


Рис. 4.15. Схема гидравлического тарана

Скорость потока за клапаном нарастает, возникает перепад напора на клапане, который в некоторый момент превышает вес клапана. Клапан мгновенно перекрывает поток, и давление в трубопроводе резко повышается – возникает гидравлический удар. Возросшее давление открывает напорный клапан 5, через который вода поступает в напорный колпак 6, сжимая в нем воздух. Давление в трубопроводе падает, напорный клапан закрывается, а ударный – открывается, и цикл повторяется снова. Сжатый в колпаке воздух гонит воду по нагнетательной трубе 7 в нагнетательный резервуар 8.

Первый гидравлический таран построили в городе Сен-Клу под Парижем братья Жозеф и Этьен Монгольфье в 1796 году. Теорию гидравлического тарана создал в 1908 года Н. Е. Жуковский. Его работы позволили усовершенствовать конструкцию этого устройства и повысить его КПД.

#### 4.4.3. Теория расчета и область применения гидравлического тарана

Полный цикл работы тарана можно представить тремя периодами:

1) период разгона – период времени от начала открытия ударного клапана до момента, при котором скорость в трубе станет наибольшей и клапан закроется:

$$t_{\text{разг}} = \tau \ln \frac{1+k}{1-k},$$

где  $\tau = l / \sqrt{2gH(1 + \xi_{\text{пит}} + \xi_{\text{кл}})}$ ,  $l$  – длина питательной трубы,  $H$  – напор перед клапаном (питательный напор);  $\xi_{\text{пит}}$  и  $\xi_{\text{кл}}$  – коэффициенты сопротивления при движении жидкости питательного трубопровода и

ударного клапана;  $k = v / \sqrt{\frac{2gH}{1 + \xi_{\text{пит}} + \xi_{\text{кл}}}}$  – коэффициент разгона,  $v$  –

наибольшая скорость в питательной трубе, которая для весового клапана определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{2G}{\rho S_{\text{кл}} \xi_{\text{кл}}}},$$

где  $G$  – вес клапана,  $S_{\text{кл}}$  – площадь выходного отверстия ударного клапана;

2) период нагнетания – период от момента открытия нагнетательного клапана до момента его закрытия, при котором происходит нагнетание жидкости в воздушный колпак:

$$t_{\text{наг}} = (v / (gh_{\text{д}}) + 1/c)l,$$

где  $h_{\text{д}} = h + \sum h_{\text{наг}} - (H - \sum h_{\text{пит}})$  – динамическая высота нагнетания,  $\sum h_{\text{наг}}$  и  $\sum h_{\text{пит}}$  – потери напора в нагнетательном и питательном трубопроводах;

3) период отражения – период от момента закрытия нагнетательного клапана до открытия ударного клапана, при котором не происходит ни нагнетания, ни разгона:



$$0 < t_{\text{отр}} < 2l/c.$$

Технические параметры гидротаранной установки:

1. Продолжительность полного цикла

$$T = t_{\text{разг}} + t_{\text{наг}} + t_{\text{отр}}.$$

2. Расход жидкости, сброшенной тараном,

$$q' = \left( \frac{Sl}{1 + \xi_{\text{пит}} + \xi_{\text{кл}}} \ln \left( \frac{1}{1 - k^2} \right) \right) / T,$$

где  $S$  – площадь сечения питательной трубы.

3. Производительность таранной установки

$$q = \frac{Sl}{2gh_d T} \left( k^2 \frac{2gH}{1 + \xi_{\text{пит}} + \xi_{\text{кл}}} - \left( \frac{gh_d}{c} \right)^2 \right).$$

4. КПД таранной установки

$$\eta = \frac{qh}{QH},$$

где  $Q = q' + q$  – общий расход таранной установки.

Имеются пределы применения таранных установок.

1. Минимальный питательный напор  $H$  зависит от веса клапана  $G$ . При большом весе клапана и малом питательном напоре ( $H < G/S_{\text{кл}}$ ) клапан может не закрыться и таран не будет работать.

2. Максимальный нагнетательный напор  $h$  связан со скоростью движения в питательной трубе в конце разгона. При больших скоростях возможны большие сопротивления в питательной трубе и работа таранной установки становится неэффективной. При  $v = 1,5 - 3,0$  м/с возможен нагнетательный напор до 300 м.

3. Нижний предел отношения напоров ограничен автоматической работой таранной установки, которая возможна при  $h/H > 2$ .

4. Верхний предел отношений напоров ограничен КПД таранной установки  $h/H < 20 - 25$ . Например, КПД = 0,80–0,85 при  $h/H = 2$ , КПД = 0,15–0,20 при  $h/H = 30$ .

## 5. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

Энергия ветра человеком используется с давних времен для производства механической работы – помола зерна, поднятия воды, передвижения парусных судов. В Беларуси в 50-х годах прошлого столетия эксплуатировалось около 500 ветроэнергетических установок (ВЭУ), которые после полной электрификации страны и выработки ресурса были демонтированы. В настоящее время интерес к утилизации ветровой энергии возник вновь.

### 5.1. Происхождение ветра

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание солнцем земной поверхности. Теплый воздух поднимается вверх, уступая место холодному воздуху. Земная поверхность неоднородна: суша, океаны, горы, леса обуславливают различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений. Все эти причины осложняют общую циркуляцию атмосферы. Возникает ряд отдельных циркуляций, в той или иной степени связанных друг с другом. Ветровые потоки делятся на пассаты, бризы, муссоны и местные ветра.

**Пассаты** это ветровые потоки, вызванные неравномерностью нагрева земной поверхности у экватора и у полюсов. На экваторе у земной поверхности лежит зона затишья со слабыми переменными ветрами. На север и на юг от зоны затишья расположены зоны пассатов, которые вследствие вращения Земли с запада на восток имеют отклонение к западу. Таким образом, в северном полушарии постоянные ветры приходят с северо-востока, в южном – с юго-востока, как показано на схеме (рис. 5.1), и отличаются равномерностью воздушных течений по направлению и скорости.

Пассаты простираются примерно до 30° северной и южной широт. Средняя скорость юго-восточных пассатов северного полушария у поверхности земли

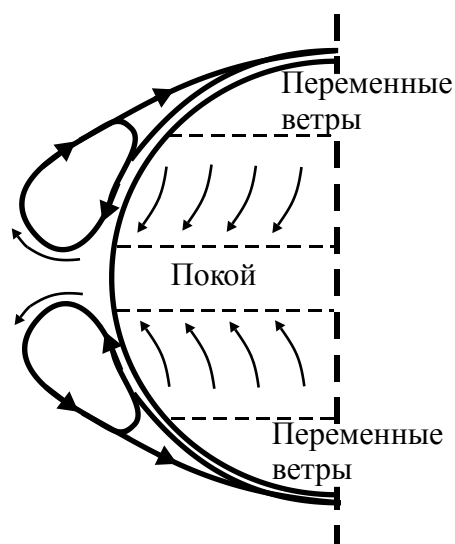


Рис. 5.1. Схема общей циркуляции земной атмосферы

достигает 6–8 м/с. Высота слоя пассатов простирается от 1 до 4 км. Выше над пассатами находится слой переменных ветров, а над этим слоем – зона антипассатов, дующих в направлении, противоположном направлению пассатов. Высота слоя антипассатов меняется от 4 до 8 км в зависимости от времени года и от места.

**Бризы** – это ветровые потоки, вызванные неравномерностью нагрева земной и водной поверхности в течение суток. Днем 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 течет в верхнем слое в сторону моря и на некотором расстоянии от берега опускается вниз. Таким образом, возникает циркуляция воздуха с направлением вниз – на берег моря, вверх – от суши к морю. Ночью над сушей воздух охлаждается сильнее, чем над морем, поэтому направление циркуляции изменяется: вниз воздух течет на море, а вверх с моря на сушу.

**Муссоны** – это ветровые потоки, вызванные неравномерностью нагрева суши материков и водной поверхности больших морей и океанов в течение года. Происхождение муссонов похоже на происхождение бризов, но муссоны более крупного размера. Летом континент нагревается сильнее, чем окружающие его моря и океаны; благодаря этому над континентом образуется пониженное давление, воздух внизу устремляется к континенту от океанов, аверху наоборот, течет от континентов к окружающим океанам. Эти ветры носят название морских муссонов. Зимой континенты значительно холоднее, чем поверхность моря; над ними образуется область повышенного давления; вследствие этого нижние слои воздуха направляются от континента к океанам, а в верхних слоях, наоборот, от океанов к континентам. Эти ветры называются материковыми 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. У восточных берегов Азии также наблюдаются муссоны. Зимой дуют суровые северо-западные материковые ветры; летом – юго-восточные и южные морские влажные ветры. Эти ветры значительно влияют на климат Дальневосточного края.

**Местные ветры** – это ветры, обусловленные особенностью местного рельефа земной поверхности (моря, горы и т. п.).

## 5.2. Потенциал энергии ветра в Республике Беларусь

Прежде чем использовать ветер в качестве источника энергии, необходимо знать, каким потенциалом он обладает. Этот потенциал зависит от следующих факторов: среднегодовой и среднемесячной скорости ветра, повторяемости скоростей и направления ветра, длительности периодов затишья и интенсивных ветровых порывов, максимальной скорости ветра.

**Скоростью ветра** называют расстояние, проходимое массой воздуха в течение единицы времени вдоль земной поверхности. Скорость ветра постоянно меняется не только по величине, но и по направлению. Кроме того, величина скорости ветра не постоянна по высоте от земной поверхности. Вблизи земной поверхности из-за влияния неровности рельефа местности скорость ветра затухает до нуля.

С ростом высоты скорость ветра изменяется по экспоненциальному закону. Скорость ветра на высоте более 5 м может быть определена по формуле

$$v_0 = v_{10} (H/10)^\alpha,$$

где  $v_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 м;  $\alpha$  – показатель степени, который в зависимости от географической координаты и характера местности, изменяется в диапазоне 0,14–0,33.

При этом неровности рельефа местности оказывают существенное влияние на распределение скорости. Если поверхность занята строениями, лесом, то скорость ветра на одной и той же высоте будет меньше, чем над открытой поверхностью.

Наибольшее число данных по скорости ветра накоплено на высоте флюгера, равной 10 м. Для Беларуси, по данным многолетних наблюдений, среднегодовые скорости ветра составляют от 3,0 до 4,1 м/с, а среднемесячная максимальная – до 4,9 м/с. Максимальные среднемесячные скорости ветра достигаются зимой, а минимальные – летом.

В соответствии с другими источниками среднегодовая скорость ветра в отдельных регионах Беларуси предполагается более высокой и может составлять выше 5 м/с. Скорость ветра в целом зависит как от времени года, так и от времени суток. Для принятия решения об использовании энергии ветра необходим тщательный анализ о ее располагаемом потенциале.

### 5.3. Структурная схема лопастной ветроэлектрической установки и ее основные технические параметры

Лопастная ветроустановка состоит из следующих основных элементов (рис. 5.2): 1 – ветроколесо, 2 – регулятор установки лопастей ветроколеса, который обеспечивает изменение угла поворота лопасти пропорционально изменению скорости ветра и вывод лопастей во флюгерное положение (отключение агрегата) при достижении ава-

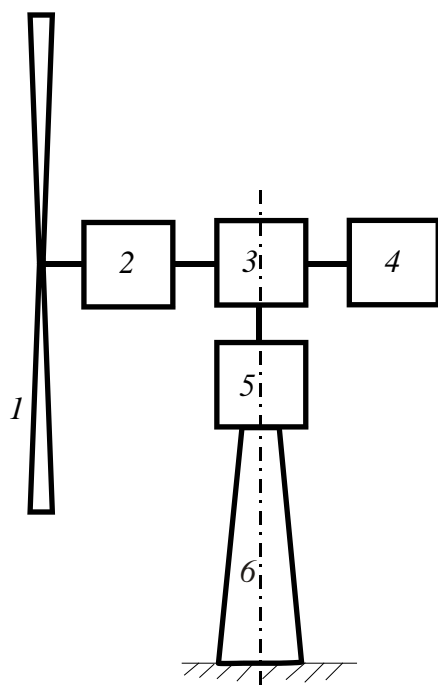


Рис. 5.2. Структурная схема лопастной ветроустановки

рийной скорости ветра, 3 – редуктор, который обеспечивает подключение электрогенератора с соответствующей мощностью и необходимую частоту вращения ротора генератора (50 Гц), 4 – электрический генератор, 5 – механизм поворота оси ветроколеса параллельно ветровому потоку, 6 – опора.

Передача мощности на горизонтально-осевых установках осуществляется от лопастей через втулку, на больших установках, через многоступенчатый редуктор и с промежуточным включением элементов сцепления, на генератор. К этому добавилась другая важная подсистема с высокими требованиями к механике и системе управления механизмом поворота в направлении ветра, а у многих современных установок – и механизмом изменения угла лопастей. Эта

значительная механическая часть установки обуславливает, как правило, в большой степени надежность, необходимость в техническом обслуживании и срок жизни установки.

Одним из наиболее важных показателей работы ветроустановки является ее мощность:

$$N = N_{\text{вп}} \cdot \eta,$$

где  $N_{\text{вп}} = \frac{1}{2} \rho v^3 S = \frac{\pi}{8} \rho v^3 D^2$  – мощность ветрового потока, Вт,  $S$  – оме- таемая площадь ветроколеса,  $\text{м}^2$ ,  $D$  – диаметр ветроколеса, м;  $\eta = \xi_i \eta_a \eta_m \eta_{\text{пр}}$  – КПД ветровой установки,  $\xi_i$  – коэффициент использо- вания ветра идеальным ветроколесом, который представляет собой

отношение мощности идеального ветроколеса (т. е. при отсутствии аэродинамических потерь) к мощности ветрового потока, проходящего через сечение, равное ометаемой площади ветроколеса,  $\eta_a$  – коэффициент аэродинамических потерь в ветроколесе,  $\eta_m$  – коэффициент механических потерь (редуктор, подшипник),  $\eta_{пр}$  – коэффициент потерь в системе преобразования энергии после редуктора.

Чтобы при увеличении скорости ветра ограничить повышение числа оборотов и мощности, современные ветродвигатели имеют автоматические системы регулирования. Наиболее широко применяют систему регулирования выводом ветроколеса из-под ветра и поворотом лопасти относительно ее продольной оси. Последняя система регулирования более простая и менее затратная. В зависимости от регулирующего фактора (лобовой или центробежной силы), влияющего на угол установки лопасти, она делится на два вида: аэродинамическую и центробежную.

#### 5.4. Работа поверхности при действии на нее силы ветра

Посмотрим, сколько процентов энергии ветра может превратить в полезную работу поверхность, поставленная перпендикулярно к направлению ветра и перемещающаяся в этом же направлении, что имеет место, например, у ветродвигателей карусельного типа.

Рассмотрим поверхность площадью  $S$ , поставленную перпендикулярно к направлению ветра. Воздушный поток вследствие торможения его поверхностью получит подпор, будет обтекать ее и производить давление силой  $F$ . Вследствие действия этой силы поверхность будет перемещаться в направлении потока с некоторой скоростью  $u$  (рис. 5.3).

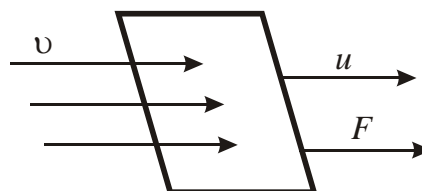


Рис. 5.3. Действие силы ветра на поверхность

Мощность  $N$ , получаемая пластиной, определяется произведением силы  $F$  на скорость  $u$ , с которой перемещается поверхность:

$$N = F u .$$

В этом случае ветер набегаёт на поверхность с относительной скоростью, равной

$$w = v - u .$$

Тогда сила сопротивления без учета аэродинамических потерь

$$F = S \frac{\rho}{2} w^2 = S \frac{\rho}{2} (v - u)^2.$$

Подставим выражение для силы  $F$  в уравнение для мощности:

$$N = S \frac{\rho}{2} (v - u)^2 u.$$

Определим коэффициент использования энергии, т. е. отношение работы, развиваемой движущейся поверхностью, к энергии ветрового потока, имеющего поперечное сечение, равное этой поверхности, а именно:

$$\xi_i = \frac{S \frac{\rho}{2} (v - u)^2 u}{S \frac{\rho v^3}{2}} = \frac{u}{v^3} (v - u)^2.$$

После преобразований получим:

$$\xi_i = \frac{u}{v} \left( 1 - \frac{u}{v} \right)^2 = \varepsilon (1 - \varepsilon)^2,$$

где  $\varepsilon = u / v$  – коэффициент торможения.

Из уравнения видно, что  $\xi_i$  зависит от скорости перемещения поверхности в направлении ветра. При некотором значении скорости  $u$  коэффициент  $\xi$  получает максимальное значение. В самом деле, если скорость перемещения поверхности равна нулю  $u = 0$ , то работа ветра также равна нулю. Если  $v = u$ , т. е. поверхность перемещается со скоростью ветра, работа также будет равна нулю, так как нет силы сопротивления, за счет которой совершается работа. Отсюда следует, что значение скорости  $u$  заключено в пределах между  $u = 0$  и  $u = v$ .

Определим значение  $\varepsilon$ , при котором  $\xi_i$  будет иметь максимальную величину. Для этого возьмем первую производную и приравняем ее к нулю.

$$\frac{d\xi_i}{d\varepsilon} = \frac{d}{d\varepsilon} \left[ \varepsilon (1 - \varepsilon)^2 \right] = \frac{d}{d\varepsilon} (\varepsilon - 2\varepsilon^2 + \varepsilon^3) = 0$$

или

$$\frac{d\xi_i}{d\varepsilon} = 1 - 4\varepsilon + 3\varepsilon^2 = 0.$$

Решая это равенство, находим, что  $\xi_i$  принимает максимальное значение, когда  $e = 1/3$ , при этом  $\xi_{i\max} = 0,149$ . Следовательно, максимальный коэффициент использования энергии ветра при работе поверхности силой сопротивления не может быть больше 0,149.

## 5.5. Теория идеального лопастного ветроколеса

**Идеальным лопастным ветроколесом** называют ветроколесо, у которого:

- 1) ось вращения параллельна скорости ветра;
- 2) бесконечно большое число лопастей очень малой ширины;
- 3) профильное сопротивление лопастей равно нулю, и циркуляция вдоль лопасти постоянна;
- 4) потерянная скорость воздушного потока на ветроколесе постоянна по всей ометаемой поверхности ветряка;
- 5) угловая скорость стремится к бесконечности.

Теорию идеального ветряка впервые разработал В. П. Ветчинкин в 1914 году на основе теории идеального гребного винта. В этой работе он установил понятие коэффициента использования энергии ветра идеальным ветряком. В 1920 году проф. Н. Е. Жуковский изложил теорию «Ветряной мельницы», в которой сделал вывод коэффициента использования энергии ветра идеальным ветряком. Теория идеального ветряка проф. Н. Е. Жуковского носит название классической.

Рассмотрим равномерный поток ветра, набегающий на идеальное ветроколесо со скоростью  $v$  в сечении  $AA'$  (рис. 5.4). В сечении  $BB'$  на ветроколесе скорость  $v_1 = v_0 - \Delta v_1$ , а на некотором расстоянии позади ветряка в сечении  $CC'$  скорость составляет  $v_2 = v_0 - \Delta v_2$ .

При этом вращающееся ветроколесо создаст подпор, вследствие чего скорость потока, по мере приближения к ветряку и некоторое время за ветряком, падает, как показано кривой 1 на рис. 5.4. Вместе с этим давление воздуха  $p$ , по мере приближения к ветряку, повышается (кривая 2), и при прохождении через ометаемую поверхность оно резко падает. За ветряком образуется некоторое разрежение  $p_0 - p_2$ , которое, по мере удаления от ветряка, асимптотически приближается к нулю, т. е. восстанавливается нормальное давление.

Через ометаемую поверхность  $S$  ветроколеса протекает воздух с массовым расходом  $G$ :

$$G = \rho S v_1.$$



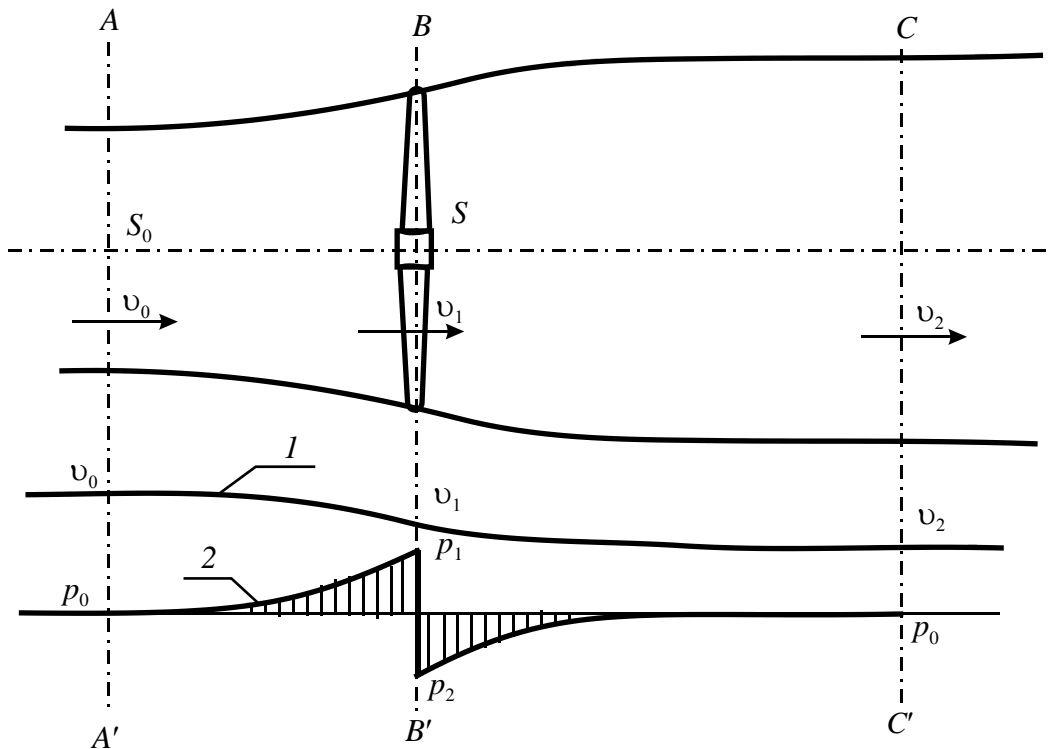


Рис. 5.4. Характеристика воздушного потока, протекающего через ветроколесо

Кинетическая энергия ветра перед ветряком равна  $Gv_0^2/2$ , а за ветряком  $Gv_2^2/2$ . Разность этих энергий затрачена на ветроколесе и, в случае отсутствия потерь, может быть определена как полезная мощность:

$$N = \frac{G(v_0^2 - v_2^2)}{2}.$$

Мощность, воспринятую ветроколесом, можно выразить как произведение из силы давления ветра  $F$  на скорость в плоскости ветряка:

$$N = F v_1.$$

Силу лобового давления  $F$  можно определить из уравнения приращения количества движения струи, проходящей через ометаемую поверхность, т. е.

$$F t = m \Delta v_2.$$

Тогда

$$F = \frac{m}{t} \Delta v_2 = G \Delta v_2 = \rho S_1 v_1 \Delta v_2.$$

Подставив значение силы  $F$  в уравнение мощности, получим

$$N = G \cdot \Delta v_2 \cdot v_1.$$

Приравняв оба уравнения для мощности ветроколеса, находим, что:

$$\frac{G(v_0^2 - v_2^2)}{2} = G \cdot \Delta v_2 \cdot v_1,$$

откуда

$$v_0 + v_2 = 2v_1;$$

$$v_0 + v_0 - \Delta v_2 = 2v_0 - 2\Delta v_1;$$

$$\Delta v_2 = 2\Delta v_1.$$

Это равенство показывает, что потеря скорости воздушного потока происходит не только в сечении ветроколеса, но и на некотором расстоянии за ветряком, причем полная потеря скорости в два раза больше потери на ветроколесе.

Взяв отношение мощности, воспринятой идеальным ветроколесом к энергии ветра, которая протекала бы через сечение, равное омеваемой поверхности ветряка, получим идеальный коэффициент использования энергии ветра

$$\xi_i = \frac{Gv_1\Delta v_2}{G_0v_0^2/2} = \frac{\rho S v_1 \Delta v_2 v_1}{\rho S v_0^3/2} = \frac{4v_1^2 \Delta v_1}{v_0^3} = \frac{4\Delta v_1 (v_1 - \Delta v_1)^2}{v_0^3} = 4e(1-e)^2,$$

где  $e = \Delta v_1 / v_0$  – коэффициент торможения.

Определим значение  $e$ , при котором  $\xi_i$  будет иметь максимальную величину. Для этого возьмем первую производную и приравняем ее нулю.

$$\frac{d\xi_i}{de} = \frac{d}{de} [4e(1-e)^2] = \frac{d}{de} (4e - 8e^2 + 4e^3) = 0,$$

или

$$\frac{d\xi_i}{de} = 4 - 16e + 12e^2 = 0.$$

Решая это равенство, находим, что  $\xi_i$  принимает максимальное значение, когда  $e = 1/3$ , при этом  $\xi_i = 0,593$ , а

$$v_0 = 3\Delta v_1 = \frac{3}{2} \Delta v_2 = \frac{3}{2} (v_0 - v_2).$$

Тогда

$$2v_0 = 3v_0 - 3v_2;$$

$$v_2 = v_0/3.$$

Таким образом, из классической теории идеального ветряка вытекают следующие основные положения.

1. Максимальный коэффициент использования энергии ветра идеального ветроколеса равен  $\xi_i = 0,593$ .

2. При этом скорость ветра за ветроколесом будет в три раза меньше скорости ветра перед ветроколесом.

Наиболее полно, с точки зрения практического применения, теория идеального ветряка изложена проф. Г. Х. Сабининым, согласно которой коэффициент использования энергии ветра идеальным ветряком равен 0,687.

Отличие этой теории от прежних теорий заключается в том, что при определении осевой силы давления потока на ветроколесо импульс сил подсчитывается по вихревому солениоиду в том месте, где он принял уже установившуюся цилиндрическую форму, а не в момент его образования, как принималось прежними теориями. Так как солениоид в цилиндрической части имеет площадь сечения большую, чем площадь, ометаемая ветроколесом, то осевая сила и коэффициент использования энергии ветра, по теории Г. Х. Сабинина, получаются несколько большими:

$$F = \rho S_1 v_0 \Delta v_2; \quad \xi_i = 4e \frac{1-e}{1+e}.$$

## 5.6. Работа ветрового колеса крыльчатого ветродвигателя

Крыльчатые ветроколеса работают за счет косого удара при движении лопастей перпендикулярно к направлению скорости ветра в противоположность к прямому удару, рассмотренному в предыдущем случае. Устройство такого колеса показано на рис. 5.5.

На горизонтальном валу закреплены крылья, число которых у современных ветродвигателей бывает от двух и больше. Крыло ветроколеса состоит из маха 1 и лопасти 2, закрепляемой на махе так, что она образует с плоскостью вращения некоторый угол  $\varphi$ . Этот угол называют углом установки лопасти (рис. 5.5). При этом на ее элементы набегают воздушный поток с относительной скоростью  $w$  под углом  $\alpha$ , который называют углом атаки, и действует с силой  $F$ . Углы  $\varphi$  и  $\alpha$  в значительной мере определяют эффективность крыльев. Силу  $F$  раскладывают на силы  $F_x$  и  $F_y$  (рис. 5.5). Силы  $F_x$  производят давление в направлении ветра, которое называется лобовым. Силы  $F_y$  действуют в плоскости вращения ветроколеса и создают крутящий момент.

Максимальные силы, приводящие колесо во вращение, получаются при некотором значении угла атаки  $\alpha$ , т. е. угла наклона относительно-

го потока к поверхности лопасти. Ввиду того, что окружная скорость по длине крыла не одинакова, а возрастает по мере удаления его элементов от оси вращения ветроколеса, относительная скорость  $w$  набегающего потока на лопасть также возрастает. Вместе с этим убывает угол атаки  $\alpha$ , и при некоторой окружной скорости  $u = R\omega$ , где  $\omega$  – угловая скорость, этот угол станет отрицательным (рис. 5.5). Следовательно, не все элементы крыла будут иметь максимальную подъемную силу.

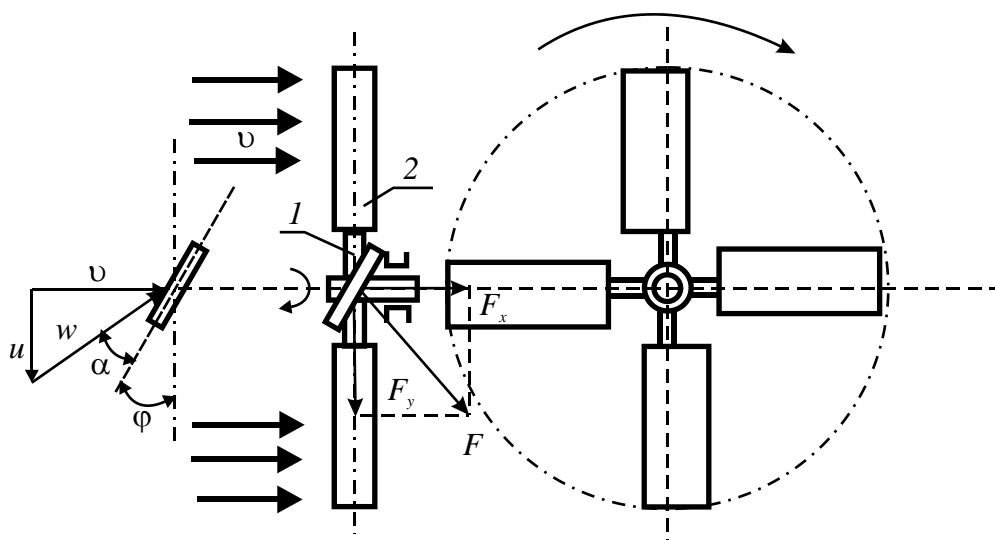


Рис. 5.5. Схема действия сил воздушного потока на элемент лопасти крыльчатого ветроколеса и план скоростей потока и лопасти

Если мы будем уменьшать угол  $\phi$  каждого элемента лопасти по мере удаления его от оси вращения так, чтобы оптимальный угол атаки  $\alpha$  примерно сохранялся постоянным, то мы получим условие, при котором приблизительно все элементы лопасти будут работать со своей максимальной подъемной силой. Лопасть с переменным углом установки имеет форму винтовой поверхности.

Правильные углы установки лопасти при хорошем аэродинамическом качестве профиля, а также ширине, соответствующей заданной быстроходности, обеспечивают высокий коэффициент использования энергии ветра (до 0,46).

Аэродинамические потери (около 10–12%) в ветроколесах разделяются на четыре группы.

1. Концевые потери, происходящие за счет образования вихрей, сходящих с концов лопастей.
2. Профильные потери, которые вызываются трением струи воздуха о поверхность крыла и зависят только от профиля лопастей.

3. Потери на кручение струи за ветряком, равные кинетической энергии тангенциальных скоростей уходящей струи.

4. Потери, происходящие вследствие неполного использования всей ометаемой площади.

### 5.7. Классификация ветродвигателей по принципу работы

Существующие системы ветродвигателей по схеме устройства ветроколеса и его положению в потоке ветра разделяются на три класса.

**Первый класс** ветродвигателей – это ветродвигатели, у которых ось вращения горизонтальна и параллельна потоку ветра. Такие ветродвигатели называются крыльчатыми (рис. 5.6).

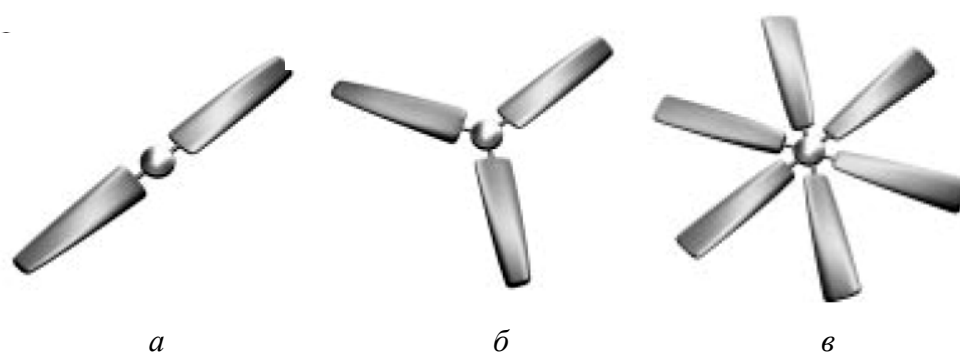


Рис. 5.6. Крыльчатые ветродвигатели:

*a* – двухлопастный; *б* – трехлопастный; *в* – многолопастный

Крыльчатые ветродвигатели характеризуются коэффициентом быстроходности, который равен отношению окружной скорости конца лопасти  $u$  к скорости ветра  $v$ :

$$Z = \frac{u}{v} = \frac{\omega \cdot R}{v},$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения ветроколеса;  $R$  – радиус ветроколеса.

В зависимости от быстроходности крыльчатые ветродвигатели разделяются на тихоходные ( $Z < 3$ ) и быстроходные ( $Z \geq 3$ ). Быстроходные ветродвигатели малолопастные (с числом лопастей до 4, (рис. 5.6, *a*, *б*)), а тихоходные – многолопастные (с числом лопастей от 4 до 24 (рис. 5.6, *в*)). Чем меньше лопастей, тем при прочих равных условиях ветроколесо имеет большее число оборотов. Для лучших быстроходных двигателей коэффициент использования энергии ветрового потока 0,42–0,46, а для тихоходных – 0,27–0,33. С другой стороны, тихоходные ветродвигатели имеют рабочий момент, в несколь-

ко раз больший, чем у быстроходных, что позволяет им эффективно работать при более низких скоростях ветра.

**Второй класс** ветродвигателей – это ветродвигатели с вертикальной осью вращения ветрового колеса (рис. 5.7). По конструктивной схеме они разбиваются на группы:

- роторные ветродвигатели системы Савониуса (рис. 5.7, *а*);
- карусельные, у которых подвижные нерабочие лопасти либо прикрываются ширмой, либо располагаются ребром против ветра (рис. 5.7, *б*, *в*).

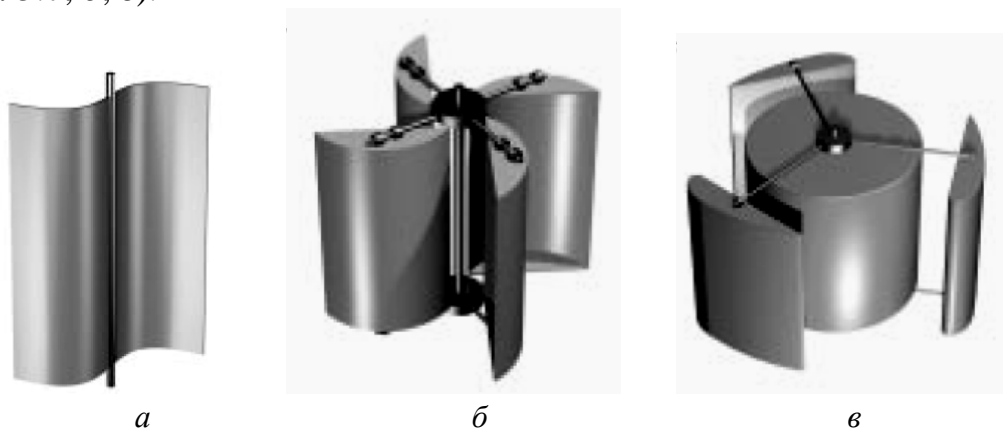


Рис. 5.7. Ветроколеса с вертикальной осью вращения:  
*а* – Савониуса; *б*, *в* – карусельные

**Третий класс** ветродвигателей – это барабанные ветродвигатели, у которых ось вращения горизонтальна и перпендикулярна направлению ветра (рис. 5.8). Они работают по принципу водяного мельничного колеса: когда лопасть находится на верху барабана, она воспринимает лобовую силу воздействия ветра, а когда лопасть находится внизу – она прижимается к барабану и не воспринимает лобовую силу ветра.

Существенное преимущество вертикальноосевых установок – они не нуждаются в механизме поворота в направлении ветра и в сложной конструкции ротора. Другое их преимущество заключается в том, что такие основные компоненты, как редуктор и генератор, располагаются вблизи земли и легкодоступны. Таким образом, не требуется дорогостоящих мачтовых конструкций и значительно облегчаются техническое, эксплуатационное обслуживание и ремонт, что ведет к снижению эксплуатационных расходов.

Основные недостатки вертикальноосевых установок и барабанных вет-

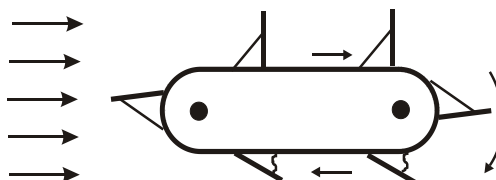


Рис. 5.8. Барабанный ветродвигатель

родвигателей вытекают из самого принципа расположения рабочих поверхностей ветроколеса в потоке ветра, а именно:

1) так как рабочие лопасти колеса перемещаются в направлении воздушного потока, ветровая нагрузка действует не одновременно на все лопасти, а поочередно. В результате каждая лопасть испытывает прерывную нагрузку, коэффициент использования энергии ветра получается весьма низким и не превышает 30%;

2) движение поверхностей ветроколеса в направлении ветра не позволяет развить большие обороты, так как поверхности не могут двигаться быстрее ветра;

3) размеры используемой части воздушного потока (ометаемая поверхность) малы по сравнению с размерами самого колеса, что значительно увеличивает его вес, отнесенный к единице установленной мощности ветродвигателя.

У роторных ветродвигателей системы Савониуса максимальный коэффициент использования энергии ветра – 25%, у карусельных – 30%, у барабанных – 18%.

Крыльчатые ветродвигатели свободны от перечисленных выше недостатков карусельных и барабанных ветродвигателей. Хорошие аэродинамические качества крыльчатых ветродвигателей, конструктивная возможность изготавливать их на большую мощность, относительно легкий вес на единицу мощности – основные преимущества ветродвигателей этого класса.

Коммерческое применение крыльчатых ветродвигателей началось с 1980 года. За последние 14 лет мощность ветродвигателей увеличилась в 100 раз: от 20–60 кВт при диаметре ротора около 20 м в начале 1980 году до 5000 кВт при диаметре ротора свыше 100 м к 2003 году. Некоторые прототипы ветродвигателей имеют еще большие мощности и диаметры ротора. За указанный период стоимость генерируемой ветряками энергии снизилась на 80%.

### **5.8. Причины недостаточной эффективности работы ветроустановок и способы ее повышения**

Основная причина недостаточного использования ветровой энергии состоит в особенностях работы лопастных (самых распространенных) ветроустановок. Плоская форма лопасти достаточно эффективна только в ограниченном диапазоне скоростей ветра – около 5–25 м/с. Из-за больших растягивающих напряжений лопасти при скоростях более 25 м/с могут разрушаться, и поэтому они должны поворачи-

ваться в безопасное флюгерное положение. Это практически полностью исключает возможность работы ветровой установки в штормовых условиях. При скоростях менее 5 м/с подъемная сила лопасти и соответственно крутящий момент ветрового колеса малы, вследствие чего ветровое колесо останавливается и трудно запускается вновь. Следовательно, с учетом периодичности и низкой среднегодовой скорости ветра использование лопастных ветроустановок в Республике Беларусь малоэффективно. К отмеченному следует добавить также экологическую и эксплуатационную опасность лопастных ветроустановок, связанную с довольно высокой скоростью вращения концов лопастей ветроколеса (в 4–6 раз выше скорости ветра), что может приводить к разрушению лопастей и гибели птиц. Все это создает необходимость разработки новых типов ветродвигателей, в которых такие недостатки отсутствуют.

Существуют следующие способы повышения эффективности работы ветроустановок:

- 1) увеличение скорости ветра за счет удаления ветроколеса от земной поверхности;
- 2) увеличение диаметра ветроколеса;
- 3) применение концентраторов (диффузоров или конфузоров) воздушного потока;
- 4) использование генераторов вихревых потоков;
- 5) использование многоступенчатых генераторов, обеспечивающих переменную выработку мощности в зависимости от скорости ветра;
- 6) применение установок, использующих эффект Магнуса.

Поднятие ветроколеса малоэффективно, так как скорость увеличивается с высотой незначительно, при этом повышаются требования к надежности опоры. Увеличение диаметра ветроколеса также ограничено прочностными характеристиками и обычно не превышает 30–40 м (имеется несколько ветроустановок с диаметром ветроколеса 60–80 м). Использование диффузоров и конфузоров для ветроэлектрических установок пока считается экономически невыгодным. Использование вихревых потоков дает увеличение скорости действующего на ветроколесо потока в несколько раз, при этом достигается увеличение мощности в 100 и более раз. Это позволит использовать ветроэлектрические установки с низкими среднегодовыми скоростями ветра, что особенно интересно для Республики Беларусь. Однако стоимость ветроустановки при этом значительно возрастает.



## 5.9. Эффект Магнуса

Если цилиндр привести во вращение вокруг своей оси, то из-за сил трения и вязкости воздуха через некоторое время вблизи поверхности цилиндра молекулы воздуха начнут вращаться со скоростью поверхности цилиндра  $u$ .

Если на вращающийся круглый цилиндр набегают поток воздуха со скоростью  $v$  в направлении, перпендикулярном к оси цилиндра (рис. 5.9), то вокруг него возникает циркуляция  $v_\theta = -2v \sin \theta$ . При этом возникает избыточное давление воздуха на поверхности цилиндра, обусловленное взаимодействием двух потоков, которое определяется из уравнения Бернулли:

$$p = \frac{\rho v^2}{2} - \frac{\rho(u - v_\theta)^2}{2} = \frac{\rho v^2}{2} \left( 1 - (2 \sin \theta + u/v)^2 \right).$$

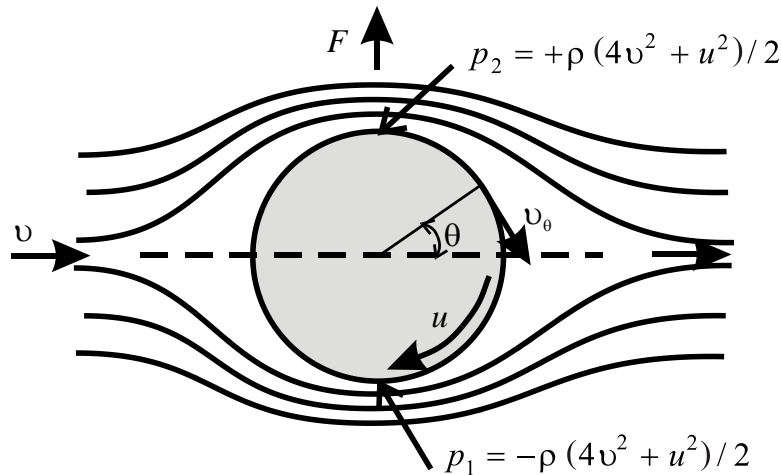


Рис. 5.9. Эффект Магнуса

Циркуляция вокруг цилиндра создает силу, действующую на цилиндр в направлении, перпендикулярном к направлению потока, и называемую поперечной силой. Значение этой силы определяется путем интегрирования проекции удельной силы давления на вертикальную ось по контуру:

$$F = -lr \int_0^{2\pi} p \sin \theta d\theta = 2\pi r \rho v u l.$$

Поперечная сила направлена всегда к той стороне вращающегося тела, на которой направления вращения тела и скорости потока совпадают. Это явление называется эффектом Магнуса, по имени ученого,

впервые открывшего его в 1852 году. До изобретения нарезных артиллерийских орудий часто случалось, что шаровые снаряды после вылета из ствола значительно отклонялись в сторону от той траектории, по которой они должны были бы лететь. Магнус показал, что причиной такого поведения снаряда служило вращение вокруг поперечной оси, которое шаровой снаряд получал вследствие случайных причин. На основании сказанного выше это создавало условия, необходимые для возникновения поперечной силы, которая и вызывала нежелательное отклонение снаряда от намеченной траектории. Такие же боковые отклонения, часто очень значительные, наблюдаются и при полете «крученого» мяча при игре в теннис.

Позднее в Италии были построены суда, которые перемещались от действия ветра на вращающиеся цилиндры. Испытания показали техническую пригодность такого роторного корабля, но в экономическом отношении он оказался менее выгодным обычных моторных судов и поэтому не получил дальнейшего применения.

Схема роторной ветроустановки на основе эффекта Магнуса представлена на рис. 5.10.

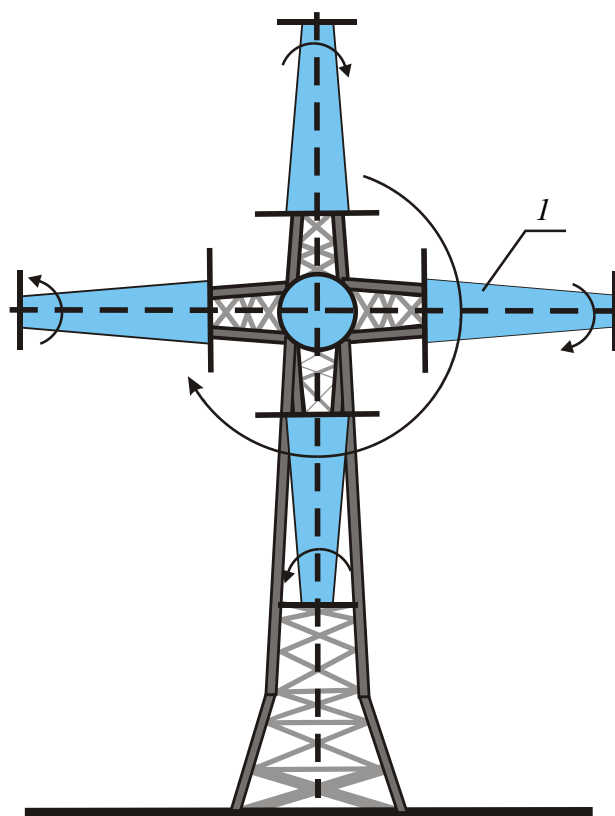


Рис. 5.10. Роторная установка на основе эффекта Магнуса

На концах цилиндров *1* помещаются выступающие круглые диски, так как иначе воздух, проходящий за торцами цилиндра, засасывается в область потока с пониженным давлением и, возмущая поток, уменьшает поперечную силу. Затраты энергии на вращение цилиндров составляют 5–15% мощности ветроустановки.

На рис. 5.11 представлены зависимости коэффициентов использования мощности ветрового потока для трехлопастной *1* и роторной *2* ветроустановок, повторяемости скоростей ветра для Республики Беларусь *3* от скорости ветра. Показано, что для наиболее характерных скоростей ветра (3–5 м/с) для Республики Беларусь коэффициент использования мощности ветрового потока для роторных ветроустановок максимален (0,20–0,25) и больше, чем у лопастной ветроустановки. Максимальный коэффициент использования мощности ветрового потока лопастной ветроустановки (0,38–0,42) соответствует скоростям ветра 6–9 м/с, редко наблюдаемым на территории Республики Беларусь.

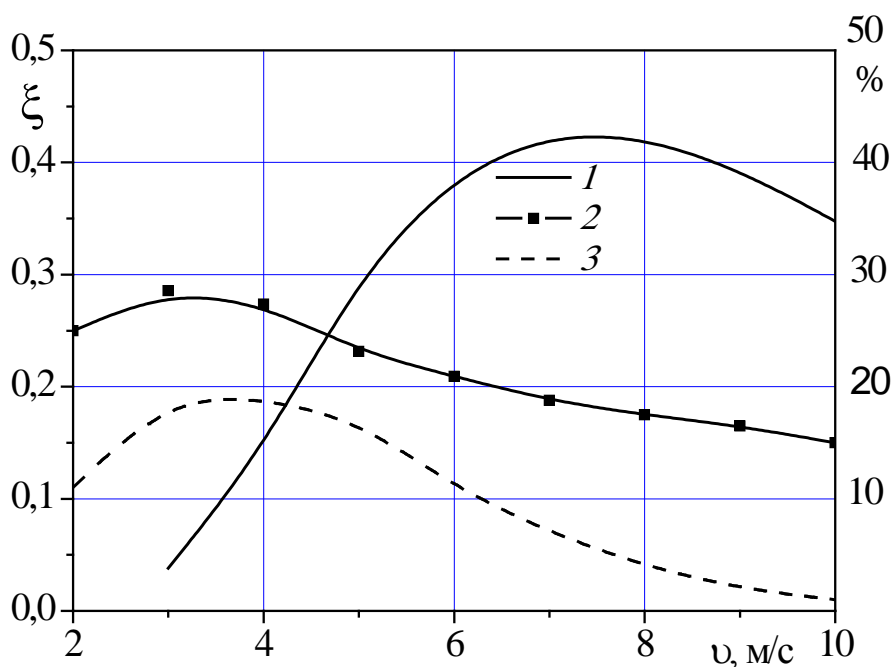


Рис. 5.11. Зависимости коэффициентов использования мощности ветрового потока для трехлопастной (1) и роторной (2) ветроустановок, повторяемости скоростей ветра (3) для Республики Беларусь от скорости ветра

Однако из-за несовершенства качества выполнения конструкции современные роторные установки имеют достаточно низкий коэффициент механических потерь (60–80%), что снижает их итоговую эффективность и они пока не имеют широкого распространения на тер-

ритории Республики Беларусь. Перспективным направлением считается совмещение лопастной и роторной ветроустановок, когда на одном махе установлен и ротор и лопасть. Это позволит увеличить величину крутящего момента, снизить частоту вращения ротора и расширить рабочий диапазон скорости ветра – от 2 до 40 м/с.

#### **5.10. Целесообразность использования энергии ветра в Республике Беларусь**

Учитывая географические и климатические особенности, ветроэнергетику в Беларуси можно отнести к частично перспективному направлению. В соответствии с этой классификацией регионы республики с постоянной удельной мощностью ветрового потока выше  $150 \text{ Вт/м}^2$ , которые перспективны для ветроэнергетики, составляют небольшую долю от общей площади. Страна не обладает высоким потенциалом по скоростям ветра, которого было бы достаточно для строительства мощных ветроэлектростанций (ВЭС). Хотя такие возможности не исключаются в перспективе с использованием ВЭУ нового поколения. В республике ветроэнергетика может быть перспективной с номинальной мощностью ветроагрегатов до 50 кВт для автономных потребителей в сельской местности, удаленных от основных энергоисточников. Такие ВЭУ могут быть использованы по всей территории Беларуси со среднегодовой скоростью ветра ниже 4,5 м/с.

Тип и характеристики агрегата для его эффективного использования необходимо выбирать, учитывая ветровые, гидрологические и хозяйственные условия зоны. Если, например, в районе с сильными ветрами установить ветроагрегат с тихоходным двигателем (многолопастный), то он может выйти из строя вследствие больших аэродинамических нагрузок на ветроколесо. С другой стороны, использование быстроходных (малолопастных) агрегатов без пусковых устройств в зонах с малой среднегодовой скоростью ветра (меньше 3,5 м/с) может привести к снижению выработки.

В связи с периодичностью и непостоянством ветровых потоков может быть реализовано несколько режимов работы ВЭУ. Наибольший интерес представляют ветроэлектрические станции, которые могут быть подключены к электрической сети, что обеспечивает стабильность энергоснабжения. В случае выработки излишней энергии она передается в сеть, а при ее недостатке она заимствуется из электрической сети. Автономные ВЭС могут быть снабжены резервными дизельгенераторами и аккумуляторами. В последнем случае отпадает необходимость в под-

держании нормированной частоты электрического тока. Все эти меры позволяют обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей и рационально использовать генерируемую энергию ВЭС.

Области и цели эффективного применения ветроустановок:

1) выработка электроэнергии – для локальных объектов (лесной кордон, пост ГАИ, контролирующие и т. д.), для освещения участков дорог;

2) выработка механической энергии – водоподъем на пастбищах, аэрация воды на рыбоводных прудах, озонирование и ионизация зерно- и овощехранилищ, привод стационарных сельскохозяйственных машин (мельниц, сепараторов и др.);

3) выработка тепловой энергии – отопление и горячее водоснабжение небольших объектов (бытовки, теплицы, сушилки и др.).

Широкое применение находят ветронасосные установки. Вода в основном используется для полива и водоснабжения скотных дворов. Энергозатраты в сельском хозяйстве на водоподъем и орошение составляют не менее 10% от общего потребления энергии. Для подъема воды лучше использовать поршневые насосы, так как привод от ветронасосной установки обеспечивает низкую частоту вращения. Ветронасосные установки при благоприятных ветровых условиях не только обеспечивают текущие потребности потребителей, но и накапливают воду для ее использования в случаях снижения мощности или прекращения работы ветронасосной установки.

Ветровая энергия может непосредственно быть преобразована в тепло. Эффективность превращения механической энергии ветра в тепло в процессе ее диссипации составляет 100%. Однако турбулизированные ветроустановки для получения тепла непосредственно путем преобразования механической работы на самой установке создают повышенный шум. Выгодней для этих целей использовать теплонасосные установки.

Сдерживающим фактором внедрения ветровых установок является более высокая себестоимость вырабатываемой энергии по сравнению с традиционными способами. Постепенно эта разница сокращается.

## 6. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Под геотермикой (от греческих слов «гео» – земля и «термо» – тепло) понимается наука, изучающая тепловое состояние земной коры и Земли в целом, его зависимость от геологического строения, состава горных пород, магматических процессов и целого ряда других факторов.

Геотермальная теплота представляет собой самый крупный постоянный во времени (ее мощность не зависит от суточных, годовых и других периодов) и относительно равномерно распределенный по поверхности Земли источник энергии, которым располагает человечество. Причем это энергия в чистом виде, так как она уже существует как теплота, и поэтому для ее получения не требуется сжигать топливо или создавать реакторы.

Геотермальные месторождения подразделяются на три типа:

- месторождения сухого пара;
- месторождения горячей воды;
- месторождения нагретых пород.

К сожалению, на Земле редко встречаются выходы природного пара или перегретых вод, вскипающих в атмосфере с достаточным образованием пара. Гораздо более распространенными являются естественные подземные бассейны термальных вод с температурами, меньше температуры кипения. В настоящее время термальные воды с экономической выгодой применяют для обогрева домов, теплиц, курортов, а иногда целых заводов, рудников и даже городов. Также люди пользуются теплыми источниками для медицинских и бытовых целей.

Энергией тепла нагретых пород человечество стало пользоваться очень давно, раньше, чем другими видами возобновляемых источников энергии. С древних времен люди рыли землянки, погреба и ямы для хранения овощей и фруктов. На практическом опыте была получена информация о наличии источника тепла внутри Земли. К сожалению, пока не существует даже демонстрационных установок, извлекающих энергию из сухих пород. Однако запасы тепла нагретых пород столь обширны и доступны, что, в конце концов, привлекут к себе внимание энергетиков.

Республика Беларусь не обладает месторождениями сухого пара и перегретой горячей воды. Однако имеются небольшие запасы низкопотенциальных источников минерализованной воды в Припятской впадине и обширные запасы теплых грунтов (1% этих запасов до глубины 6 км обеспечит все потребности республики в энергии).

## 6.1. Тепловой режим земной коры

Критерием теплового состояния земного шара является поверхностный градиент температуры, позволяющий судить о потерях тепла Земли. Экстраполируя градиент на большие глубины, можно в какой-то степени оценить температурное состояние земной коры. Величина, соответствующая углублению в метрах, при котором температура повышается на 1 С, называется геотермической ступенью.

В связи с изменением интенсивности солнечного излучения тепловой режим первых 1,5–40 м земной коры характеризуется суточными и годовыми колебаниями. Далее имеют место многолетние и вековые колебания температуры, которые с глубиной постепенно затухают. Температура горных пород на глубине  $H$  приближенно может быть определена по формуле

$$T = t_0 + \frac{(H - h)}{\sigma},$$

где  $t_0$  – средняя температура земной коры на глубине  $h$  зоны постоянных температур (1,5–40 м);  $\sigma$  – геотермическая ступень.

Средняя величина геотермической ступени для Республики Беларусь равна 33 м с плотностью исходящих в направлении поверхности тепловых потоков  $\sim 0,06$  Вт/м<sup>2</sup>.

Геотермические условия чрезвычайно разнообразны. Это связано с геологическим строением того или иного района Земли. Известны случаи, когда увеличение температуры на 1°С происходит при углублении на 2–3 м. Эти аномалии обычно находятся в областях современного вулканизма. На глубине 400–600 м в некоторых районах, например Камчатки, температура достигает до 150–200°С и более. Геотермические наблюдения в зоне вечной мерзлоты позволили установить, что мощность мерзлых горных пород достигает 1,5 тыс. м. Здесь геотермическая ступень составляет 500 м на 1°С.

На отдельных платформенных частях территории (на Русской платформе) температура с изменением глубины примерно следующая: 500 м – не выше 20°С, 1 тыс. м – 25–35°С; 2 тыс. м – 40–60°С; 3–4 тыс. м – до 100°С и более.

## 6.2. Использование тепла горячих земляных пластов

Обычно у теплоносного слоя пористая структура – скальные породы имеют поры, заполненные водой (пористость оценивается коэф-

фициентом  $\alpha$ ). Средняя плотность твердых пород земной коры  $\rho_{\text{гр}} = 2700 \text{ кг/м}^3$ , а коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{гр}} = 2 \text{ Вт/(м·К)}$ .

В расчетной практике характеристики геотермальной энергетики обычно относят к  $1 \text{ км}^2$  поверхности  $S$ .

Теплоемкость пласта  $c_{\text{пл}}$  (Дж/К) можно определить по уравнению

$$c_{\text{пл}} = [\alpha \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} + (1 - \alpha) \cdot \rho_{\text{гр}} \cdot c_{\text{гр}}] \cdot h \cdot S,$$

где  $\rho_{\text{в}}$  и  $c_{\text{в}}$  – соответственно плотность и изобарная удельная теплоемкость воды;  $\rho_{\text{гр}}$  и  $c_{\text{гр}}$  – плотность и удельная теплоемкость нагретых пород (пород пласта), обычно  $c_{\text{гр}} = 820\text{--}850 \text{ Дж/(кг·К)}$ ;  $h$  – толщина слоя нагретого пласта.

Если задать минимально допустимую температуру, при которой используется тепловая энергия пласта  $T_1$  (К), то можно оценить его тепловой потенциал к началу эксплуатации (Дж):

$$E_0 = c_{\text{пл}} \cdot (T_2 - T_1).$$

Постоянную времени пласта  $\tau_0$  (возможное время его использования, лет) в случае отвода тепловой энергии путем закачки в него воды с объемным расходом  $V$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) можно определить по уравнению

$$\tau_0 = c_{\text{пл}} / (V \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}}).$$

Считают, что тепловой потенциал пласта во время его разработки изменяется по экспоненциальному закону

$$E = E_0 \cdot \exp(-\tau/\tau_0),$$

где  $\tau$  – число лет с начала эксплуатации.

Тепловая мощность геотермального пласта в момент времени  $\tau$  (лет с начала разработки) (Вт):

$$\left( \frac{dE}{d\tau} \right)_{\tau} = -\frac{E_0}{\tau_0} \exp\left( -\frac{\tau}{\tau_0} \right).$$

В принципе сухие горячие породы, имеющие высокую температуру и являющиеся потенциальным источником энергии, можно обнаружить в любой точке земного шара путем бурения достаточно глубоких скважин. Однако на практике с ростом глубины скважин ее стоимость возрастает по экспоненте. В настоящее время глубина скважин не превышает 6000 м (для Беларуси это глубина соответствует температуре грунтов около  $150^\circ\text{C}$ ). Пока не существует экономически выгодного метода извлечения из сухих горячих пород в земной коре. Однако имеется ряд предложений по решению этой задачи.



При использовании энергии тепла грунтов возникают следующие проблемы:

- создание достаточно глубокой скважины, позволяющей достигнуть высоких температур;
- обеспечение высокой мощности извлечения тепла из скважины.

Необходимо еще учитывать, что из-за низких температур грунтов КПД переработки их тепловой энергии в электрическую не превысит 15%.

Первая проблема связана с технологией бурения скважин и не будет рассмотрена в рамках данного курса. Однако следует отметить, что на территории Республики Беларусь эта проблема может быть решена за счет использования пустых нефтяных скважин (как правило, при поиске нефти на каждую нефтеносную скважину бурится около десяти пустых). Такие скважины в большом количестве имеются в Припятском районе.

Вторая проблема связана с тем, что теплопроводности воды (наиболее дешевого теплоносителя) недостаточно для обеспечения высокой интенсивности извлечения тепла из скважин стандартного диаметра. Бурение скважин большего диаметра не целесообразно, так как стоимость скважины будет возрастать прямо пропорционально площади поверхности полученной скважины.

Эту проблему можно решить путем обнаружения естественных водонепроницаемых полостей в недрах Земли на достаточной глубине. В этом случае бурится две скважины, соединяющие полость с поверхностью Земли. В одну скважину с более низким выходом под высоким давлением закачивают холодную воду, а из другой скважины за счет избыточного давления и низкой плотности поступает горячая вода (рис. 6.1). Большой объем скважины позволяет обеспечить высокую интенсивность извлечения тепла.

К сожалению, такие водонепроницаемые полости в недрах Земли встречаются редко и их трудно обнаружить. Предложено несколько способов создания искусственных водо-

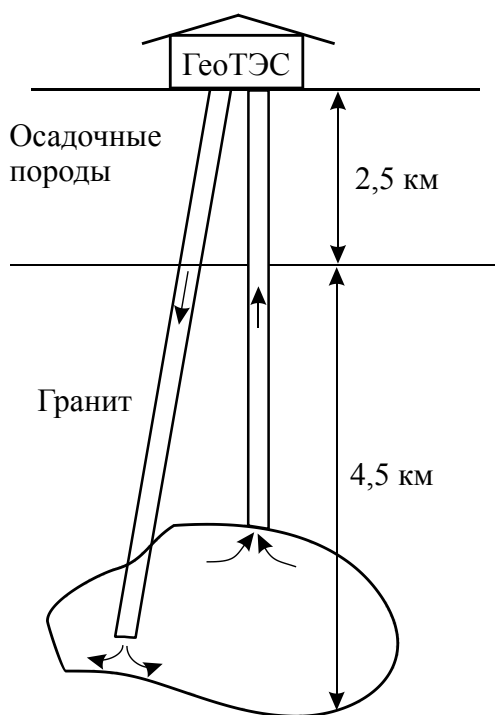


Рис. 6.1. Схема использования тепла естественных полостей Земли

проницаемых полостей: последовательное проведение взрывов достаточно мощных ядерных зарядов (организация взрывов взрывчатых веществ малоэффективна и дорога), гидроразрыв.

Организация ядерных взрывов помимо опасности, связанной с постоянным наличием радиоактивных обломков, образовавшихся во время этих взрывов, может вызвать серию землетрясений. Поэтому этот способ пока находится на стадии изучения.

Гидроразрыв предусматривает использование высоконапорного насоса на поверхности земли для создания в скважине давления жидкости, достаточного для растрескивания породы, образования водонепроницаемых полостей. Это стандартный метод подготовки нефтяной или газовой скважины.

Недостатком предложенного способа извлечения тепла являются интенсивные минеральные отложения и коррозия на поверхности трубопроводов.

Эффективная транспортировка тепла из недр Земли с высокой интенсивностью может осуществляться также с помощью специального устройства – тепловой трубы.

### **6.3. Тепловая труба**

Тепловая труба представляет собой замкнутую систему, которая обеспечивает высокую теплопроводность за счет использования теплоты парообразования жидкости.

Впервые термин «тепловая труба» был предложен Г. М. Гровером и использован в описании к патенту США и в статье «Устройство, обладающее очень высокой теплопроводностью». Гровер на одной из демонстраций принципа действия тепловой трубы перед журналистами показал такой впечатляющий опыт: один конец тепловой трубы ввел в электрическую дугу, второй конец опустил в емкость с водой; вода мгновенно закипела, а поливая конец трубы жидким азотом – заморозил воду.

В 1964 году появилась первая фирма, развернувшая серийное производство тепловых труб. В 1967 тепловая труба была впервые испытана на космическом спутнике на околоземной орбите, а в 1968 – впервые применена для теплового регулирования спутника «Геос-Б» (две тепловые трубы осуществляли снижение до минимума разность температур между датчиками, расположенными в разных частях спутника).

В последующие годы сфера применения тепловых труб резко расширилась: от авиации, радиоэлектроники и гелиотехники – до бы-

товой техники и криохирургии. Это объясняется универсальностью применения теплового поля в современной технике в составе теплофизических структур.

Основные достигнутые характеристики современных тепловых труб: рабочий диапазон температур 4–2300°K, скорость теплопередачи – звуковой предел, мощность теплопередачи – до 20 кВт/см<sup>2</sup>, ресурс работы – 20 000 ч.

Таким образом, тепловая труба, являясь высокоэффективной и надежной технической системой, перекрывает весь практически значимый для современной техники диапазон температур. Теплопроводность даже в самых простых тепловых трубах в сотни раз превышает теплопередачу по медному стержню того же диаметра.

### 6.3.1. Конструкция и принцип действия

Вообще тепловые трубы могут иметь произвольную форму, но обычно при экспериментальных исследованиях и теоретических анализах рассматривается труба в виде прямого цилиндра (рис. 6.2). Внутри корпуса диаметром  $d_{тр}$  вводят небольшое количество жидкости, создают вакуум (откачивают воздух) и герметизируют. При подводе тепла к зоне испарения 1 жидкость переходит в пар, давление насыщения паров в этой зоне резко повышается, пар 2 движется вверх по центру

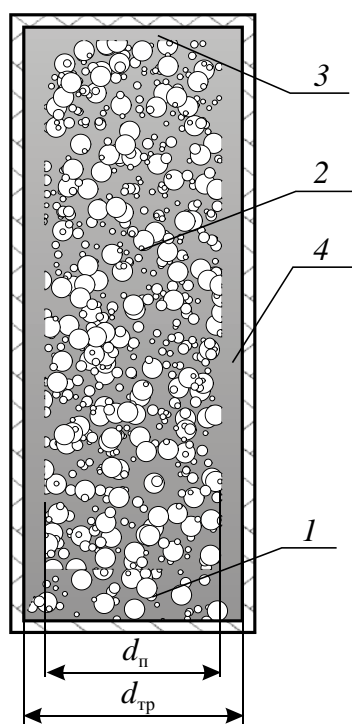


Рис. 6.2. Схема тепловой трубы

трубы в коридоре диаметром  $d_{п}$  в зону с меньшим давлением, переходит в жидкость в зоне конденсации 3 и конденсат 4 стекает по стенкам вниз. Следует отметить, что тепловая труба способна обеспечить большую мощность теплопередачи даже при малой разности температур между его концами, так как скрытая теплота парообразования у жидкостей велика.

Тепловая труба, в которой возврат конденсата в зону испарения осуществляется под действием гравитационного поля, называется **термосифоном**. Из-за своей особенности принципа работы термосифон может работать только тогда, когда зона испарения находится ниже зоны конденсации (т. е. труба должна располагаться вертикально или с небольшим уклоном).

Для обеспечения возврата конденсата в зону испарения при любой ориентации тепловой трубы было предложено заменить гравитационную силу капиллярной, возникающей при смачивании рабочей жидкостью капиллярно-пористого материала – фитиля. Однако классическая тепловая труба с использованием капиллярного эффекта обеспечивает независимость положения зоны испарения в гравитационном поле в ограниченных условиях. Поэтому кроме гравитационных и капиллярных сил в современных тепловых трубах применяют центробежные, электростатические, магнитные и другие виды полей для возврата конденсата.

Наиболее распространенный тип тепловой трубы состоит из трех элементов: корпус, рабочая жидкость, капиллярно-пористый материал.

**Корпус** обеспечивает изоляцию рабочей жидкости от внешней среды. Он должен быть герметичным, выдерживать перепад давлений между внутренней и внешней средами, обеспечивать подвод теплоты к рабочей жидкости и отвод теплоты от нее. Выполнять его можно из жестких (медь, стекло, бронза, алюминиевые сплавы) и гибких (пластмасса) материалов, с любым сечением (круглым или прямоугольным). Минимальный диаметр тепловой трубы должен быть таким, чтобы внутренний диаметр зоны транспорта пара исключал действие капиллярных сил, т. е. чтобы паровой канал не превратился в капиллярный.

**Рабочая жидкость** обеспечивает главную функцию системы и должна иметь точку фазового перехода жидкость-пар в требуемом диапазоне рабочих температур. Она не должна разлагаться при этих температурах, должна обладать достаточно большой скрытой теплотой парообразования, хорошо смачивать материал фитиля и корпуса, иметь низкое значение вязкости жидкой и паровой фаз, высокую теплопроводность и высокое поверхностное натяжение.

Большое поверхностное натяжение жидкости необходимо для создания достаточно большого капиллярного напора для хорошей работы против сил гравитации. Для хорошего смачивания корпуса и фитиля жидкость должна иметь краевой угол смачивания, близкий к нулю. Чем выше скрытая теплота парообразования, тем меньше требуется жидкости. Жидкость с высокой теплопроводностью сведет к минимуму перепад температур между стенкой и поверхностью испарения (тем меньше вероятность возникновения пузырькового кипения на границе фитиля со стенкой корпуса). Чем меньше вязкость жидкости, тем меньше гидравлическое сопротивление ее течению.

В зависимости от интервала температур могут быть использованы самые различные вещества, приведенные к жидкой фазе: аммиак ( $-60...+100^{\circ}\text{C}$ ), фреон-11 ( $-40...+120^{\circ}\text{C}$ ), ацетон ( $0...+120^{\circ}\text{C}$ ), вода ( $+30...+200^{\circ}\text{C}$ ) и т. д.

**Капиллярно-пористый материал (фитиль)** обеспечивает создание капиллярного напора для перемещения жидкости из конденсатора в испаритель и равномерного распределения ее по всей зоне испарения. К материалу предъявляются противоречивые требования: он должен быть мелкопористым для создания максимального напора и крупнопористым для увеличения проницаемости (по жидкости). В связи с этим в условиях работы против сил гравитации практически не используется тепловая труба длиной более 1 м. Слои капиллярно-пористого материала вдоль стенок должны быть толстыми для увеличения расхода жидкости и тонкими для уменьшения термического сопротивления фитиля в радиальном направлении.

Наиболее часто используют металлические сетки, металлические ткани саржевого плетения, спеченные металлические порошки, металлический войлок.

Достоинства тепловой трубы:

- 1) отсутствие нагнетателей, т. е. затрат на перемещение среды;
- 2) герметичность, позволяющая в качестве рабочей среды использовать агрессивные вещества;
- 3) легкость регулирования;
- 4) высокая теплопередача (в сотни раз больше, чем у любого металла).

### 6.3.2. Энергетический баланс

Энергетический баланс вертикальной капиллярной тепловой трубы состоит из двух уравнений: массового и гидродинамического.

Массовое уравнение выражает собой равенство расходов пара  $G_{\text{п}}$  и конденсата  $G_{\text{к}}$ :

$$G_{\text{п}} = G_{\text{к}};$$

$$\rho_{\text{п}} v_{\text{п}} d_{\text{п}}^2 = \rho_{\text{к}} v_{\text{к}} (d_{\text{тр}}^2 - d_{\text{п}}^2),$$

где  $\rho_{\text{п}}, \rho_{\text{к}}$  – плотность пара и конденсата соответственно;  $v_{\text{п}}, v_{\text{к}}$  – скорость движения пара и конденсата соответственно.

Гидродинамическое уравнение выражает собой равенство перепадов давления по паровому  $\Delta p_{\text{п}}$  и конденсационному  $\Delta p_{\text{к}}$  пути между зоной испарения и зоной конденсации:

$$\Delta p_{\pi} = \Delta p_{\kappa};$$

$$\frac{2\sigma \cos \theta}{R_{\text{кап}}} + \rho_{\kappa} g l = \lambda_{\pi} \frac{l}{d_{\pi}} \frac{\rho_{\pi} v_{\pi}^2}{2} + \lambda_{\kappa} \frac{l}{K(d_{\text{тр}} - d_{\pi})} \frac{\rho_{\kappa} v_{\kappa}^2}{2},$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение рабочей жидкости;  $\theta$  – угол смачивания;  $R_{\text{кап}}$  – радиус капилляра пористого материала;  $l$  – транспортная длина рабочей жидкости;  $K$  – проницаемость материала;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления среды.

Тепловое уравнение представляет собой сумму изменений энергии жидкости и пара.

Количество передаваемого тепла определяется из уравнения

$$Q = Gr,$$

где  $r$  – теплота парообразования, зависящая от рода жидкости и давления внутри трубы.

### 6.3.3. Область работы

Для нормальной работы тепловой трубы необходимо, чтобы режимы работы всех ее элементов не достигали критических величин. Перечислим некоторые явления, ограничивающие область работы тепловой трубы.

**Срыв жидкости.** Направления движения пара и жидкости в тепловой трубе противоположны. Поэтому на поверхности раздела фитиль – паровой поток на жидкость действуют касательные напряжения – возможен срыв капель. Унос капель жидкости наступит тогда, когда скоростной напор пара превысит силы поверхностного натяжения жидкости. Установлено, что чем тоньше сетка (чем меньше шаг проволочек), тем менее вероятен унос капель.

**Ограничение мощности тепловой трубы по вязкости.** При низких температурах преобладающими являются силы вязкости в паровом потоке: чем они выше, тем меньше скорость пара и мощность теплопередачи. Установлено, что для увеличения скорости пара достаточно снизить давление (в идеале до нуля) в зоне конденсации, т. е. снизить температуру этого конца тепловой трубы.

**Звуковой предел.** Снижение давления (температуры) в зоне конденсации и повышение температуры в зоне испарения как бы увеличивает «разность потенциалов» между концами тепловой трубы, тем самым повышая скорость движения пара. Однако существует физический предел – скорость звука, при достижении которого уже никакое увеличение «разности потенциалов» не приводит к повышению ско-

рости пара. Достигается состояние, которое носит название «запирание» канала тепловой трубы. При этом если продолжать и далее уменьшать температуру в зоне конденсации, то тепловая труба теряет свойство изотермичности – по ее длине будет наблюдаться значительный градиент температур.

**Капиллярное ограничение** (ограничение по смачиванию фитиля). При возрастании теплового потока в зоне испарения должен возрасти приток жидкости по фитилю. Предельная величина притока жидкости зависит от типа конструкции фитиля.

**Кризис теплоотдачи.** Плотность теплового потока не должна превышать некоторое значение, при котором может наступить кризис теплоотдачи (осушение фитиля, когда капиллярно-пористый материал не успевает подавать новые порции жидкости в зону испарения). Для неметаллических жидкостей характерно возникновение пузырькового кипения в фитиле зоны испарения. Это затрудняет отвод образующегося на греющей поверхности пара через толщу фитиля, а следовательно, ограничивает мощность теплопередачи (например, предел мощности для воды –  $130 \text{ кВт/м}^2$ , для калия –  $315 \text{ кВт/м}^2$ ).

#### **6.3.4. Способы регулирования теплопередачи**

Для осуществления качественного теплоснабжения необходимо поменять регулирование тепловой трубы. Тепловая труба допускает как двухпозиционное (включено или выключено), так и плавное регулирование.

Имеются следующие способы регулирования теплопередачи тепловой трубы: дросселирование потока конденсата, дросселирование парового потока, изменение внешнего термосопротивления тепловых труб, газовое регулирование.

**Дросселирование потока конденсата** осуществляется путем нарушения непрерывности капиллярности пористого материала (например, пережимом фитиля). Так как конструктивное воплощение этого способа регулирования довольно сложно, а возможности регулирования ограничены, то он не нашел широкого практического применения.

**Дросселирование парового потока** осуществляется обычными клапанами, управляемыми термочувствительными элементами по температуре пара или источника. Этот способ намного проще, чем дросселирование потока конденсата. Однако диапазон плавного регулирования тепловой трубы путем дросселирования парового потока невелик и применяется только при очень низком давлении тепло-

носителя, когда большие относительные изменения потери давления в паре невелики по абсолютной величине по сравнению с располагаемым капиллярным напором. Если перепад давления в клапане будет большим, чем капиллярное давление, то пар начнет выдавливать жидкость из фитиля и проходить из испарителя в конденсатор непосредственно через фильтр. Следовательно, перепад температур, соответствующий максимальному капиллярному напору фитиля, исчерпывает диапазон регулирования.

**Изменение внешнего сопротивления** тепловых труб состоит в том, что сама тепловая труба поочередно то подключается, то изолируется от источника или потребителя тепла. Плавное регулирование теплопередающей способности трубы этим способом конструктивно очень сложно и на практике применяется редко.

**Газовое регулирование** осуществляется путем введения в тепловую трубу некоторого количества инертного неконденсирующего газа. Газ скапливается в конце зоны конденсации, вытесняя оттуда пар, и, следовательно, выключает занятую часть конденсатора из процесса передачи тепла. Доля длины конденсатора, занятая газом, зависит от физических свойств газа и теплоносителя, размеров трубы и количества газа в ней, а также от температуры. При увеличении температуры потребителя тепла объем газа увеличивается, а поверхность теплообмена уменьшается, так что температура пара в трубе остается приблизительно постоянной. Такое регулирование называется пассивным.

Этот способ регулирования конструктивно осуществим довольно просто, отличается высокой точностью регулирования и широким диапазоном. Поэтому он наиболее широко используется на практике.

#### **6.4. Подземные термальные воды (гидротермы)**

В земной коре существует подвижный и чрезвычайно теплоемкий энергоноситель – вода, играющая важную роль в тепловом балансе верхних геосфер. Жидкая вода существует только до глубин 10–15 км, ниже при температуре около 700°C вода находится исключительно в газообразном состоянии.

В любой точке земной поверхности, на определенной глубине, зависящей от геотермических особенностей района, залегают пласты горных пород, содержащие термальные воды (гидротермы). «Гидротермальная оболочка» прослеживается по всему земному шару, только на разной глубине. В районах современного вулканизма гидротер-



мальная оболочка иногда выходит на поверхность. Здесь можно обнаружить не только горячие источники, кипящие грифоны и гейзеры, но и парогазовые струи с температурой 180–200°C и выше.

Температура подземных вод колеблется в широких пределах, обуславливая их разнообразнейший химический и газовый состав. Их общая минерализация колеблется от ультрапресных категорий (менее 0,1 г/л) до категорий сверхкрепких рассолов (более 600 г/л). Гидротермы содержат в растворенном состоянии различные газы: активные (агрессивные), такие, как уголекислота, сероводород, атомарный водород, и малоактивные – азот, метан, водород.

В геотермальной энергетике могут быть использованы практически все виды термальных вод: перегретые воды – при добыче электроэнергии, пресные термальные воды – в коммунальном теплообеспечении, солоноватые воды – в бальнеологических целях, рассолы – как промышленное сырье.

Для отопления и горячего водоснабжения жилых и производственных зданий необходима температура воды не ниже 50–60°C. Наиболее рациональное использование термальных вод может быть достигнуто при последовательной их эксплуатации: первоначально в отоплении, а затем в горячем водоснабжении. Но это представляет некоторые трудности, так как потребность в горячей воде по времени года относительно постоянна, тогда как отопление является сезонным.

При значительной минерализации термальных вод применяются двухконтурные схемы с промежуточным теплообменником, что исключает образование интенсивных отложений в системах теплоснабжения.

При использовании термальной воды с низким тепловым потенциалом (температура ниже 80°C) требуется в систему отопления включать дополнительный источник тепла (котлоагрегат или тепловой насос).

Температура термальных вод в Беларуси достигает приблизительно 35–50°C в Припятской впадине. По степени минерализации они относятся к рассольным с содержанием солей от 350 до 450 г/л, что ограничивает их использование в системах теплоснабжения. Ограничивающими факторами также являются большая глубина залегания термальных вод 2000–3000 м и низкий дебет скважин (100–150 м<sup>3</sup>/сут).

Исходя из характеристик термальных вод Беларуси, можно сделать вывод, что использовать их для отопления и водоснабжения в больших объемах нецелесообразно. Большие перспективы применения геотермальная вода имеет в медицине и на промышленных предприятиях, использующих в больших объемах рассолы.

## 7. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

### 7.1. Характеристики электрического поля Земли

Планета Земля в электрическом отношении представляет собой подобие сферического конденсатора, заряженного примерно до 300 тыс. В. Поверхность Земли заряжена отрицательно, а ионосфера – положительно. Изолятором служит атмосфера Земли (рис. 7.1).

Однако атмосфера не является идеальным изолятором – через нее постоянно проходят ионные и конвективные токи утечки, которые достигают многих тысяч ампер.

Существование токов утечек в атмосфере Земли связано в основном с процессами ионизации воздуха и пространственным разделением возникающих при ионизации положительных и отрицательных электрических зарядов. Ионизация воздуха происходит под действием космических лучей ультрафиолетового излучения Солнца; излучения радиоактивных веществ, имеющихся на поверхности Земли и в воздухе; электрических разрядов в атмосфере и т. д. Многие атмосферные процессы: конвекция, образование облаков, осадки и другие – приводят к частичному разделению разноименных зарядов и возникновению атмосферных электрических полей. Утечка зарядов в атмосфере также связана с молниями и отеканием зарядов с остроконечных предметов (острий). Баланс электрических зарядов, приносимых на земную поверхность площадью  $1 \text{ км}^2$  за год, можно характеризовать следующими данными: ток проводимости  $+60 \text{ к}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ ; токи осадков  $+20 \text{ к}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ ; разряды молний  $-20 \text{ к}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ ; токи с острий  $-100 \text{ к}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ . Всего  $-40 \text{ к}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ .

Но, несмотря на имеющиеся токи утечки, разность потенциалов между обкладками конденсатора не уменьшается. Это обусловлено тем, что в солнечной системе существует источник энергии, который постоянно восполняет утечку зарядов с обкладок конденсатора. Таким источником является магнитное поле Земли, которое вращается вместе с планетой в потоке солнечного излучения.

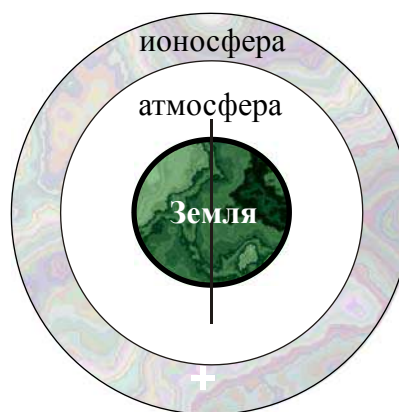


Рис. 7.1. Планетный конденсатор

Напряженность электрического поля Земли распределяется очень неравномерно по высоте: она максимальна у поверхности Земли и составляет примерно 150 В/м. С высотой она уменьшается приблизительно по закону экспоненты и на высоте 10 км составляет около 3% от значения у поверхности Земли.

Таким образом, почти все электрическое поле сосредоточено в нижнем слое атмосферы, у поверхности Земли. Вектор напряженности электрического поля Земли  $E$  направлен в общем случае вниз. Электрическое поле Земли, как и любое электрическое поле, действует на заряды с определенной силой, которая называется кулоновской силой  $F_{\text{кул}}$ . Если умножить величину заряда на напряженность электрического поля в этой точке, то получим как раз величину кулоновской силы. Эта кулоновская сила толкает положительные заряды вниз, к земле, а отрицательные – вверх, в облака.

## 7.2. Технология использования электрического поля Земли

Для того чтобы воспользоваться энергией электростатического поля Земли, нужно подключить потребитель энергии к отрицательному полюсу – Земле и к положительному полюсу – ионосфере. К Земле можно подключиться с помощью обычного металлического проводника (заземления), а к ионосфере – с помощью весьма специфического проводника – конвективного тока. **Конвективные токи** – это электрические токи, обусловленные упорядоченным переносом заряженных частиц. В природе они встречаются часто. Это обычные конвективные восходящие струи, которые несут отрицательные заряды в облака; смерчи (торнадо), которые тащат к земле сильно заряженную положительными зарядами облачную массу; восходящие потоки воздуха во внутритропической зоне конвергенции, которые уносят огромное количество отрицательных зарядов в верхние слои тропосферы. И такие токи достигают очень больших значений.

Если установить на поверхности Земли металлическую мачту и заземлить ее (рис. 7.2), то внешнее электрическое поле начнет двигать отрицательные заряды (электроны проводимости) вверх, к верхушке мачты, создавая там избыток отрицательных зарядов. А избыток отрицательных зарядов на верхушке мачты создаст свое электрическое поле, направленное навстречу внешнему полю. Наступает момент, когда эти поля сравняются по величине, и движение электронов прекращается. Это значит, что в проводнике, из которого сделана мачта, электрическое поле равно нулю.

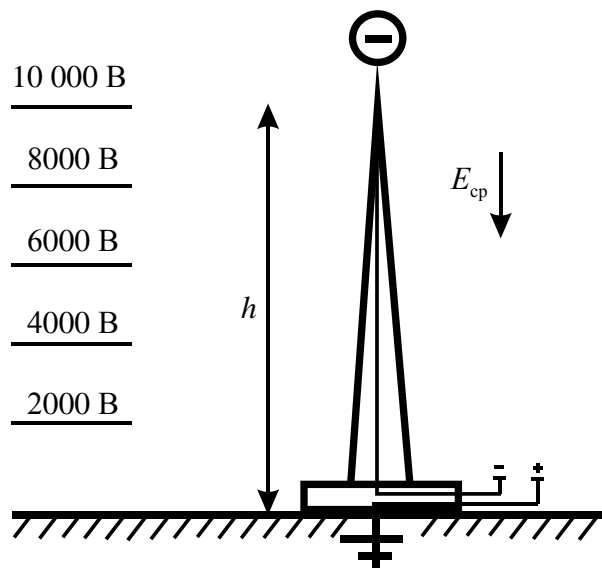


Рис. 7.2. Разность электрических потенциалов между поверхностью Земли и верхушкой мачты

Определим примерную разность потенциалов между Землей и верхушкой мачты, наведенную внешним электрическим полем. Положим, высота мачты  $h = 100$  м, средняя напряженность по высоте мачты  $E_{\text{ср}} = 100$  В/м. Тогда разность потенциалов (ЭДС) между Землей и верхушкой мачты будет численно составлять:

$$U = h E_{\text{ср}} = 100 \text{ м} \cdot 100 \text{ В/м} = 10\,000 \text{ В}.$$

Это совершенно реальная разность потенциалов, которую можно измерить. Разность потенциалов направлена противоположно вектору напряженности электрического поля Земли и стремится вытолкнуть электроны проводимости из верхушки мачты вверх, в атмосферу. Но этого не происходит, так как у электронов недостаточно энергии для того, чтобы покинуть проводник, из которого сделана мачта. Эта энергия называется работой выхода электрона из проводника и для большинства металлов она составляет менее 5 электронвольт – величина весьма незначительная. Но электрон в металле не может приобрести такую энергию между столкновениями с кристаллической решеткой металла и поэтому остается на поверхности проводника.

Помочь избыточным зарядам на верхушке мачты покинуть этот проводник можно с помощью специального устройства – **эммитера**. В этом случае отрицательный заряд на верхушке мачты уменьшится, внешнее электрическое поле внутри мачты уже не будет скомпенсировано и начнет снова двигать электроны проводимости вверх к верхнему концу мачты – по мачте потечет ток. Теперь если

подключить потребителя энергии между мачтой и заземлением, то получим электростанцию (рис. 7.2). Под действием электрического поля Земли электроны проводимости из земли движутся по мачте через нагрузку и далее вверх по мачте к эмиттеру, который освобождает их из поверхности металла верхушки мачты и отправляет в виде ионов в свободное плавание по атмосфере. Электрическое поле Земли в полном соответствии с законом Кулона поднимает их вверх до тех пор, пока они на своем пути не будут нейтрализованы положительными ионами, которые всегда опускаются вниз из ионосферы под действием того же поля.

Простейшим эмиттером может служить плоский диск из листового металла, имеющий вертикальную ось, с множеством иголок, расположенных по его окружности. При вращении диска набегающий влажный воздух срывает электроны с его иголок и таким образом освобождает их из металла. Этот эффект широко известен. Когда вертолет при монтаже высоких строений несет на длинной металлической стропе металлическую конструкцию, лопасти винтов вертолета, вращающиеся во влажном воздухе, становятся эмиттером. Это приводит к зарядке металлической конструкции, и рабочие, которые занимаются монтажом, знают, что прикасаться к ней голыми руками нельзя – «ударит током».

Возможны и другие конструкции эмиттеров, более эффективные, основанные на разных принципах и физических эффектах. Наиболее перспективными представляются следующие конструкции эмиттеров.

**1. Паровой эмиттер.** Молекула воды имеет хорошо выраженную полярность и может легко захватить свободный электрон. Если обдувать паром заряженную отрицательно металлическую пластину, то пар будет захватывать с поверхности пластины свободные электроны и уносить их с собой.

Для увеличения энергетической эффективности можно продувать не пар, а теплый влажный воздух, регулируя его влажность в нужных пределах.

**2. Капиллярный эмиттер.** Данное устройство представляет собой установленный на вершине мачты металлический сосуд с водой, соединенный с металлом мачты надежным контактом. В середине сосуда установлена одна или несколько стеклянных капиллярных трубок. Так как уровень воды в трубке выше, чем в сосуде, то это создает электростатический эффект острия – в верхней части капиллярной трубки образуется максимальная концентрация зарядов и максимальная напряженность электрического поля.

Под действием электрического поля вода в капиллярной трубке поднимется и будет распыляться на мелкие капельки, унося с собой отрицательный заряд. При определенной небольшой силе тока вода в капиллярной трубке закипит, и уже пар будет уносить заряды. А это должно увеличить ток эмиттера.

**3. Искровой эмиттер.** При пробое искрового промежутка вместе с искрой из металла выскакивает облако электронов проводимости.

Искровой эмиттер представляет собой генератор высоковольтных импульсов. Отрицательные импульсы поступают на мачту, положительные – на электрод, который образует искровой промежуток с верхушкой мачты. Получается нечто подобное обычной бытовой газовой зажигалке китайского производства с питанием от одной пальчиковой батарейки.

Главное достоинство такого устройства – возможность регулировать ток эмиттера с помощью частоты разрядов, величины искрового промежутка и пр.

Но существует один недостаток – искровые разряды создают радиопомехи. Поэтому верхушку мачты с искровыми промежутками нужно экранировать цилиндрической сеткой, изолированной от мачты.

**4. Сверхпроводниковый эмиттер.** Для того чтобы создать эмиттер на принципе прямой эмиссии электронов, необходим материал с очень низкой работой выхода электрона, например паста из оксида бария – 0,99 эВ. В идеале это должен быть комнатнотемпературный сверхпроводник (КТСП), который пока не существует в природе. Но, возможно, скоро появится.

Достаточно поместить на верхушку мачты КТСП – и эмиттер готов. Проходя по сверхпроводнику, электрон не встречает сопротивления и очень быстро приобретает энергию, необходимую для выхода из металла (около 5 эВ).

По законам электростатики напряженность электрического поля Земли наиболее высока на возвышенностях – на вершинах холмов, сопок, гор и т. п. В низинах, впадинах и углублениях она минимальна. Поэтому такие электростанции лучше строить на самых высоких местах и подальше от высоких строений или же устанавливать их на крышах самых высоких строений. Для увеличения эффективности электростанции можно поднять проводник с помощью аэростата. Такая установка незаменима в отдаленных поселениях, на метеостанциях и других удаленных от цивилизации местах.

К достоинствам электростанции на основе электрического поля Земли можно отнести следующее:

- установка проста в изготовлении и эксплуатации;
- источник вырабатывает самый удобный вид энергии – электро-энергию;
- источник экологически чист: никаких выбросов, никакого шума и т. п.

Однако у этой технологии имеются и недостатки. Установка производит постоянный ток. Электрическое поле Земли подвержено колебаниям: зимой оно сильнее, чем летом, в течение дня оно достигает максимума – в 19 часов по Гринвичу, также зависит от состояния погоды. Но эти колебания не превышают 20% от его среднего значения. В некоторых редких случаях при определенных погодных условиях напряженность этого поля может увеличиться в несколько раз. Например, во время грозы электрическое поле изменяется в больших пределах и может изменить направление на противоположное, но это происходит на небольшой площади непосредственно под грозовой ячейкой.

## 8. АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

### 8.1. Цель аккумуляирования энергии

Аккумуляирование энергии используется в промышленности уже в течение многих десятилетий. Хотя аккумуляирование само по себе не экономит энергию (а наоборот, ведет к дополнительным потерям), оно позволяет значительно облегчить управление потреблением энергии и, соответственно, снизить во многих случаях ее потребление.

Известно, что мощность большинства возобновляемых источников энергии подвержена периодическим и случайным изменениям (солнечная энергия, гидроэнергия, ветроэнергия). При этом скорость потребления энергии также изменяется во времени как в течение года (например, горячее водоснабжение), так и в течение дня (например, искусственное освещение). Приведение в соответствие выработки энергии и потребности в ней во времени может осуществляться аккумуляирующей установкой.

К другим задачам аккумуляирования энергии относятся:

- обеспечение плавного запуска энергетической установки,
- обеспечение резерва в случае внезапного прекращения работы энергетической установки.

Аккумуляторы по виду аккумуляирующей энергии могут быть:

- тепловые;
- теплехимические (например, водородный);
- электрохимические (например, свинцово-кислотные батареи);
- электрические (индукционный, электромагнитный);
- механические (гидравлический, пневматический, инерционный, упругий).

Выбор типа аккумулятора проводят по трем параметрам:

- 1) эффективность, характеризуется коэффициентом отдачи энергии и стоимостью аккумулятора (обычно определяющая оценка);
- 2) габариты, характеризуется объемной плотностью энергии (например, в автомобиле);
- 3) вес (например, в авиации или космонавтике), характеризуется весовой плотностью энергии.

Основные параметры аккумуляирующих систем приведены в таблице.



Таблица

**Аккумулярующие системы и их характеристики**

Система	Плотность энергии		Удельная стоимость, долл./МДж	Коэффициент отдачи энергии, %
	МДж/кг	МДж/л		
Тепловая с аккумулярованием за счет процесса:				
нагрева насыщенной и нена- сыщенной жидкостью	0,2	0,2	0,01–0,3	70–90
нагрева твердым телом (чугун)	0,05	0,4	5	50–90
фазового перехода (пар при $p = 15$ МПа)	2,2	0,02	0,1	60–70
сорбции	0,25	0,29	0,5	70–80
Электрическая:				
конденсаторы	–	$10^{-6}$		70–80
электромагниты	–	$10^{-3}$		90–95
Теплохимическая				
водородная при $p = 15$ МПа	140	1	0,1–10	40–60
Электрохимическая:				
свинцово-кислотная	0,1	0,29	10	70–80
натрий-серная	0,65	350	10	70–80
литиево-титановая ( $\text{Li/NiS}_2$ )	0,48	–	10	70–80
Механическая:				
гидравлическая	0,001	0,001	13	70–80
инерционная	0,05	0,15–0,40	20	75–85
пневматическая (воздух при $p = 2$ МПа)	0,02–2	2	3	45–50

**8.2. Энергетический баланс аккумулятора**

**Аккумулятор** состоит из резервуара для хранения, аккумулярующей среды (рабочего тела), устройств для зарядки и разрядки и вспомогательного оборудования.

На рис. 8.1 показан процесс аккумулярования с использованием сосуда-аккумулятора. Баланс энергии для этого процесса в общем виде можно записать как

$$E_{\text{вх}} - E_{\text{вых}} = E_{\text{ак}},$$

где  $E_{\text{вх}}$  – подведенная энергия (зарядка аккумулятора);  $E_{\text{вых}}$  – отведенная энергия (разрядка аккумулятора);  $E_{\text{ак}}$  – аккумулярованная энергия.

Применяя первый закон термодинамики для подведенной и отведенной энергии к открытой системе, получим **основное уравнение аккумулярования энергии** для открытых систем в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned} & \left( u + p/\rho + gH + v^2/2 \right)_{\text{BX}} dm_{\text{BX}} - \left( u + p/\rho + gH + v^2/2 \right)_{\text{ВЫХ}} dm_{\text{ВЫХ}} = \\ & = dL - dQ + d \left( u + gH + v^2/2 \right)_{\text{ак}} m_{\text{ак}}, \end{aligned}$$

где  $u$  – внутренняя энергия (отсчитываемая от произвольного нулевого уровня);  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность среды;  $p/\rho$  – удельная потенциальная энергия давления,  $g$  – ускорение силы тяжести;  $H$  – высота (отсчитываемая от произвольного нулевого уровня);  $gH$  – удельная потенциальная энергия положения;  $v$  – скорость течения;  $v^2/2$  – удельная кинетическая энергия;  $dL$  – работа системы, не зависящая от переноса массы (например, при движении стенок системы, электрическая энергия, энергия вала двигателя);  $dQ$  – тепло, подведенное к системе;  $m_{\text{ак}}$  – масса аккумулирующей среды.

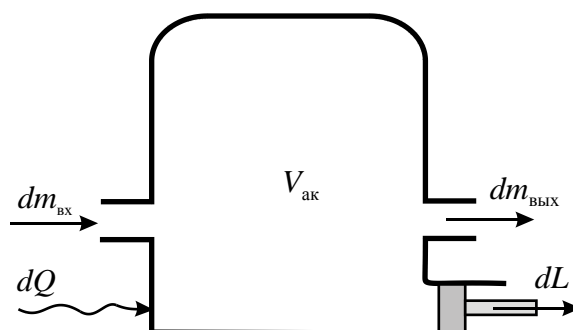


Рис. 8.1. Энергетический баланс аккумулятора

Исследование основного уравнения аккумулирования энергии показывает, что аккумулирование энергии может осуществляться в результате изменения: а) удельной внутренней энергии; б) удельной потенциальной энергии давления; в) удельной потенциальной энергии положения, г) удельной кинетической энергии; д) массы системы. К тепловому аккумулированию энергии обычно относят случай (а), а также случай (б), если удельная внутренняя энергия рабочего тела выше, чем окружающей среды. К химическому и электрохимическому аккумулированию относят случай (а), к механическому – случаи (б), (в), (г) и (д).

### 8.3. Тепловое аккумулирование энергии

**Тепловое аккумулирование** – это физические процессы, посредством которых происходит накопление тепла в тепловом аккумуляторе энергии.

Если накопление и кинетической, и потенциальной энергии исключено ( $c_{\text{ак}} = 0$ ,  $H = 0$ ) и если кинетические и потенциальные энергии

подводимых и отводимых масс пренебрежимо малы, а работа ограничена движением внешних поверхностей системы, т. е. если

$$dL = p_{\text{ак}} dV_{\text{ак}},$$

где  $p_{\text{ак}}$  – давление в аккумуляторе;  $V_{\text{ак}}$  – объем аккумулятора, то основное уравнение аккумулятирования энергии преобразуется к виду, справедливому для аккумулятора тепла:

$$(u + p\nu)_{\text{вх}} dm_{\text{вх}} + dQ - (u + p\nu)_{\text{вых}} dm_{\text{вых}} = d(um)_{\text{ак}} + p_{\text{ак}} dV_{\text{ак}}.$$

Используя определение энтальпии, имеем

$$h = u + p\nu,$$

и, следовательно, энергетический баланс принимает вид

$$h_{\text{вх}} dm_{\text{вх}} + dQ - h_{\text{вых}} dm_{\text{вых}} = d(um)_{\text{ак}} + p_{\text{ак}} dV_{\text{ак}}.$$

Соответственно баланс массы запишется как

$$dm_{\text{вх}} - dm_{\text{вых}} = dm_{\text{ак}}.$$

Согласно принятым выше определениям и выводам можно провести классификацию аккумуляторов тепла.

По виду аккумулятирующей и теплообменной среды различают прямое и косвенное аккумулятирование.

*Прямое аккумулятирование:* аккумулятирующей и теплообменной является одна и та же среда. Аккумулятирующая среда может быть твердой, жидкой, газообразной или двухфазной (жидкость плюс газ).

*Косвенное аккумулятирование:* энергия аккумулятируется только посредством теплообмена (например, теплопроводностью через стенки резервуара) либо в результате массообмена специальной теплообменной среды (в жидком, двухфазном или газообразном состоянии). Собственно аккумулятирующая среда может быть твердой, жидкой или газообразной (процесс может протекать без фазового перехода, с фазовым переходом твердое тело – твердое тело, твердое тело – жидкость или жидкость – пар).

Аккумуляторы также могут быть с постоянной или переменной массой, объемом и давлением.

При постоянной массе ( $dm_{\text{ак}} = 0$ ) обычно происходит косвенное аккумулятирование. Однако может иметь место и прямое аккумулятирование, если перемещаемая часть массы после охлаждения (при разрядке) или нагрева (при зарядке) полностью возвращается в аккумулятор (вытеснительное аккумулятирование). При переменной массе ( $dm_{\text{ак}} \neq 0$ ) всегда происходит прямое аккумулятирование. Постоянный объем ( $dV_{\text{ак}} = 0$ ) соответствует аккумулятированию в закрытых (или с

малым изменением объема) резервуарах. Переменный объем ( $dV_{\text{ак}} \neq 0$ ) соответствует аккумулярованию при атмосферном давлении или со специальным компрессионным оборудованием.

### 8.3.1. Типы тепловых аккумуляторов

#### 1. Аккумулятор с насыщенной жидкостью.

Это случай аккумулярования с постоянным объемом  $dV_{\text{ак}} \approx 0$ .

$$h_{\text{вх}} dm_{\text{вх}} + dQ - h_{\text{вых}} dm_{\text{вых}} = d(um)_{\text{ак}}.$$

Такого типа аккумуляторы в качестве рабочей среды используют двухфазную среду жидкость – пар при температуре насыщения. Резервуар заполнен на 75–95% водой в состоянии насыщения и паром на 5–25%. Зарядка аккумулятора осуществляется либо введением горячего пара, либо горячей воды, либо через теплообменник.

При зарядке аккумулятора горячим паром разрядка происходит насыщенным паром. При этом небольшая часть воды испаряется и температура понижается. Разрядка всегда сопровождается значительным понижением давления, а зарядка – повышением.

Для такого аккумулятора энергетическое уравнение примет вид

$$h_{\text{вх}} dm_{\text{вх}} + dQ - h'' dm_{\text{вых}} = d(um)_{\text{ак}},$$

где  $h''$  – энтальпия сухого пара.

При зарядке и разрядке аккумулятора горячей водой объем пара в резервуаре значительно увеличивается. Дополнительное количество пара образуется за счет испарения небольшой части воды, что приводит к некоторому снижению давления.

Энергетический баланс имеет вид

$$h_{\text{вх}} dm_{\text{вх}} + dQ - h' dm_{\text{вых}} = d(um)_{\text{ак}},$$

где  $h'$  – энтальпия кипящей воды.

В данном аккумуляторе в отличие от аккумулятора с зарядкой горячим паром массовый расход значительно больше, но циклические изменения температуры и давления меньше.

При косвенном аккумуляровании со скользящим давлением разрядка аккумулятора происходит через теплообменник. Аккумулирующая среда при постоянных массе и объеме содержится в закрытом сосуде под давлением. Тогда энергетический баланс имеет вид

$$dQ_{\text{вх}} = d(um)_{\text{ак}} + dQ_{\text{вых}},$$

где  $dQ_{\text{вых}}$  – теплота, переданная аккумулятору через теплообменник.

## **2. Аккумулятор с ненасыщенной жидкостью под давлением.**

В аккумуляторе находится жидкость с давлением выше давления насыщения, что предотвращает ее вскипание.

Поскольку  $dp = 0$ , то  $d(hm)_{\text{ак}} = d(hm_{\text{ак}}) - d(pv m_{\text{ак}})$  и энергетическое уравнение имеет вид

$$h_{\text{вх}} dm_{\text{вх}} + dQ - h_{\text{вых}} dm_{\text{вых}} = d(hm)_{\text{ак}}.$$

Если разрядка происходит через теплообменник, то  $m_{\text{ак}} = \text{const}$  и

$$dQ = m_{\text{ак}} dh = m_{\text{ак}} c_p dT = V_{\text{ак}} \rho_{\text{ак}} c_p dT.$$

В качестве рабочей среды в данном типе аккумулятора применяют: воду, смеси воды и этиленгликоля ( $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$ ), воды и  $\text{NaOH}$ , теплопроводящие масло, расплавы солей ( $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ), жидкие металлы ( $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ).

На практике водяные системы аккумулялирования применяются в районных теплосетях, системах для нагрева питающей воды тепловых электростанций, системах с расплавленными солями в солнечных электростанциях. Достоинство – простота эксплуатации, недостаток – изменение температуры рабочей среды.

## **3. Аккумулятор с твердым рабочим телом.**

В данных аккумуляторах энергия от рабочего тела обычно отбирается другим типом теплоносителя (жидкость или газ). В качестве рабочих сред используют металлы (чугун, сталь, медь, алюминий) и неметаллы (клинкер – огнеупорная глина, окислы алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , окислы магния  $\text{MgO}$ , феоит – спеченный порошок окиси железа, керамзит и др.). По данному принципу работают регенеративные теплообменники. Данные типы аккумуляторов широко применяют в составе с промышленными печами.

Достоинство – высокие объемные теплоемкости рабочего тела и возможность использования высоких температур. Основной недостаток – значительные гидравлические сопротивления при прокачке теплоносителя. Кроме того, насадки с произвольной засыпкой рабочего тела при частых температурных циклах могут быть подвержены усадке, а также радиальному расширению, которое может привести к повреждению обшивки сосуда.

## **4. Аккумулятор с использованием тепла фазового перехода.**

При фазовом переходе температура тела не меняется, а изменяется агрегатное состояние вещества (жидкость – газ, твердое тело – жидкость). Поскольку пар является малотеплоемким теплоносителем, то обычно в качестве фазового перехода используют плавление (твердое тело – жидкость).

Энтальпию фазового перехода для неорганических веществ можно определить по формуле

$$\Delta h_{\phi} = 24T_{\phi} / M ,$$

где  $T_{\phi}$  – температура фазового перехода (К);  $M$  – молекулярная масса (кмоль/кг).

Рабочее вещество –  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $T_{\phi} = 27,2^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , глауберова соль  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ( $T_{\phi} = 32^{\circ}\text{C}$ ) или  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Достоинства: высокая объемная теплоемкость, постоянство температуры и низкое давление.

Недостатки: сложность подвода и отвода тепла от рабочего вещества, так как в твердом теле конвекция отсутствует, теплопроводность низкая, а объем при фазовом переходе меняется.

Предложены и разработаны системы аккумулирования на основе использования **теплоты фазового перехода** для зарядки и разрядки воздухом  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $T_{\phi} = 27,2^{\circ}\text{C}$ ) или водой на  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  либо  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Каждый теплообменный элемент состоит из внутренней и наружной трубок, тепловой контакт между которыми обеспечивается продольными ребрами из материала с хорошей теплопроводностью (например, алюминия). Кольцевое пространство между ребрами заполнено материалом, аккумулирующим энергию фазового перехода (равную теплоте плавления). В этом варианте система теплового аккумулирования работает как гибридный аккумулятор, в котором используются теплота фазового перехода и теплота нагрева рабочего тела.

#### **5. Сорбционный аккумулятор.**

Сорбция – это процесс поглощения одного вещества другим с потреблением тепла.

Например, абсорбент гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ ) поглощает воду или  $\text{CaCl}_2$  поглощает  $\text{NH}_3$  с потреблением тепла 745 кДж/кг.

Энтальпию сорбции можно определить по формуле

$$\Delta h_c = (125 \div 150) T_c / M ,$$

где  $T_c$  – температура сорбции (К);  $M$  – молекулярная масса (кмоль/кг).

Недостаток – абсорбирующий материал должен находиться в гранулированном состоянии для улучшения аккумулирования и ускорения реакции. Однако теплопроводность такого материала низкая, что усложняет подвод и отвод тепла.

### **8.3.2. Аккумулирование в системах солнечного отопления**

Теплоснабжение от солнечной радиации имеет регулярный суточный и годовой графики, на которые налагаются случайные изме-

нения, определяемые погодными условиями. При этом существует обратная зависимость между сезонным поступлением солнечной энергии и потребностями обогрева помещения (зимой поступление солнечной энергии низкое, а потребности в обогреве высокие).

Выбор соотношения между размерами солнечного коллектора и аккумулятора для кратковременного (горячая бытовая вода) и длительного (обогрев) аккумулятирования – интересная оптимизационная задача. Общий оптимум получается в том случае, когда оптимальны характеристики как коллектора, так и аккумулятора. Удельные емкости аккумуляторов для кратковременного аккумулятирования обычно составляют 50–100 кг воды на 1 м<sup>2</sup> площади коллектора, а для длительного аккумулятирования в климатических условиях Центральной Европы необходимы значения удельной емкости 1000 кг/м<sup>2</sup>.

**Солнечный бассейн** – это система аккумулятирования с использованием горячего теплоносителя, в которой коллектор и аккумулятор совмещены (рис. 8.2). Солнечная радиация поглощается донной поверхностью бассейна. В теплоносителе создается и поддерживается градиент концентрации соли (концентрация увеличивается с глубиной) между верхним конвективным слоем (под действием ветра) и нижним конвективным слоем (в результате отвода тепла). Благодаря этому конвекция и связанный с ней теплоотвод к поверхности подавляются, и слой толщиной ~1 м, в котором нет конвекции, служит тепловой изоляцией.

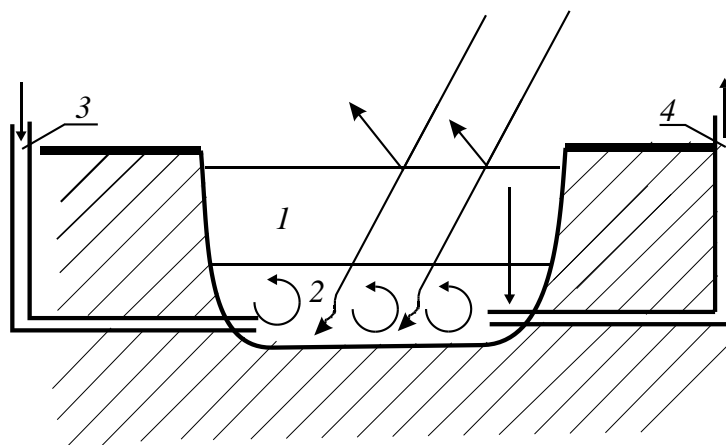


Рис. 8.2. Схема солнечного бассейна с градиентом концентрации соли:

- 1 – неконвективный (изолирующий) слой;
- 2 – конвективная (аккумулятирующая) область;
- 3 – подача холодного солевого раствора в бассейн;
- 4 – выход горячего солевого раствора к потребителю тепла

Таким способом можно достичь температуры воды 100°C, а 90°C являются обычным расчетным значением в зонах с жарким климатом.

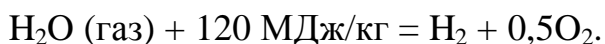
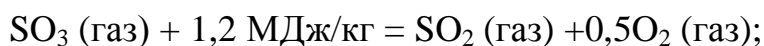
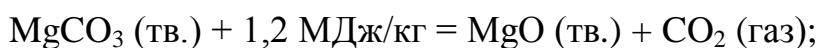
Осенью, когда температура воздуха понижается до 0°C, происходит резкое охлаждение верхнего слоя бассейна. С образованием водяного покрова теплоотдача в атмосферу резко сокращается, а придонные температуры остаются довольно высокими.

**Крупные сезонные тепловые аккумуляторы энергии.** Системы солнечного обогрева в широтах Республики Беларусь нуждаются в сезонном тепловом аккумулировании. Для больших (свыше 10 000 м<sup>3</sup>) сезонных аккумуляторов можно использовать стальные мембранные резервуары, полости в скальных породах или глине, водоносные слои, которые находятся между двумя ограничивающими пластами, а также водные бассейны.

#### 8.4. Теплехимическое аккумулирование

Энергия может удерживаться в связях многих химических элементов и выделяться в процессе экзотермических реакций, из которых наиболее известно окисление кислородом (горение). Биологическое естественное аккумулирование (т. е. аккумулирование энергии в биологических и ископаемых горючих материалах) является самым эффективным аккумулированием с высокой плотностью энергии. Однако процесс зарядки энергии при таком типе аккумулирования слишком долгий. В данном разделе будут рассмотрены лишь аккумуляторы на неорганических соединениях.

Термохимическое аккумулирование основано на использовании энергии связей обратимых химических реакций. Например:



Наиболее привлекательным является использование водородного аккумулятора. Во-первых, в Мировом океане содержится  $1 \times 10^{13}$  т водорода. Суммарная масса водорода составляет 1% от общей массы Земли. Но самое важное – это то, что водород при сгорании превращается в воду и возвращается в круговорот веществ в природе (не возникает парникового эффекта). Водород легко улетучивается, а значит, не возникает застойных взрывоопасных зон. Теплота сгорания



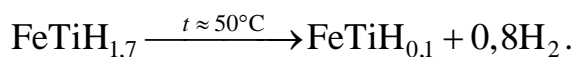
водорода в 2,8 раза выше по сравнению с бензином. Энергия воспламенения водорода в 15 раз меньше, чем для углеводородного топлива. В виде газа он может быть накоплен и передан на большие расстояния без существенных затрат (перекачка водорода дешевле, чем передача электроэнергии по проводам).

У водородного топлива также есть недостатки: водород более взрывоопасен, чем, например, метан. Объемная теплота сгорания водорода в три раза меньше, чем у природного газа.

Имеется несколько способов получения водорода: электролиз и высокотемпературное нагревание (разложение воды на составляющие будет происходить при  $T = 2700 \text{ K}$ ).

Электролиз – наиболее отработанный способ получения водорода, однако эффективность этого способа не превышает 60%. Основные потери энергии при электролизе связаны с возникновением пузырьков газа вблизи электродов, препятствующих перемещению ионов в электролите и увеличивающих общее сопротивление электрической цепи. При электролизе для получения одного кубометра водорода требуется 4–5 кВт·ч электроэнергии. Производство количества бензина с той же теплотой сгорания обходится примерно вдвое дешевле.

Один из недостатков использования водорода в энергетике – это сложность его хранения, так как в газообразном состоянии (даже под высоким давлением) он занимает большие объемы. Для решения этой проблемы предложены следующие способы: хранить водород в сжиженном состоянии (температура конденсации 20 K), в виде металлгидридов



Однако для сжижения водорода нужно потратить почти половину энергии, содержащейся в нем самом. Кроме того, должна быть обеспечена идеальная теплоизоляция.

## 8.5. Электрохимическое аккумулирование

Электричество – это наиболее совершенная форма энергии, и поэтому в направлении поисков дешевых и эффективных методов аккумулирования электрической энергии делаются значительные усилия. Устройство, допускающее как поглощение, так и выдачу электроэнергии, называют *электрическим аккумулятором*.

Хотя многие электрохимические реакции обратимы, только некоторые из них на практике подходят для создания аккумуляторов, которые допускали бы сотни циклов зарядки и разрядки при токах от

1 до 100 А. Наиболее известен и широко используется свинцово-кислотный аккумулятор, изобретенный Планте в 1860 году.

Свинцово-кислотный аккумулятор состоит из двух пластинок-электродов (свинец и диоксид свинца), помещенных в проводящий раствор-электролит (серная кислота).

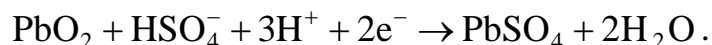
Электрический ток в электролите поддерживается ионами аккумулятора диссоциированной серной кислоты:



В процессе разряда аккумулятора на отрицательном электроде идет реакция



При этом полученный сульфат свинца замещает свинцовую пасту в ячейках электрода, а освобожденные в этой реакции электроны перемещаются по внешней цепи к положительному электроду, где вступают в реакцию



Освобожденный сульфат свинца аналогичным образом замещает оксид свинца на положительном электроде.

Свинцово-кислотный аккумулятор имеет ряд недостатков:

- 1) низкую плотность энергии, т. е. плотность энергии на единицу веса аккумулятора;
- 2) низкий КПД;
- 3) небольшой срок службы (около трех лет).

Низкая плотность энергии реального аккумулятора (~0,06 МДж/кг – 15% от идеального кислотного-свинцового аккумулятора) обусловлена тем, что реальный аккумулятор обязательно содержит неактивные элементы: корпус, сепараторы (предотвращающие короткое замыкание между электродами), воду, в которой растворена кислота (концентрация кислоты не должна быть слишком большой, чтобы аккумулятор не разряжался сам на себя).

Низкий КПД обусловлен тем, что нельзя допустить, чтобы реакция в аккумуляторе шла до полного завершения. Если весь свинец вступит в реакцию, то не станет электрода, на котором должна пойти обратная реакция. Аналогично нельзя позволить концентрации соляной кислоты упасть до слишком низкого значения: электролит перестанет быть проводником. На практике нельзя допускать разряда аккумулятора более чем на 50%.

Небольшой срок службы аккумулятора обусловлен двумя причинами.

1. Поскольку твердый свинец имеет почти в два раза большую плотность, чем участвующий в реакциях при разряде сульфат свинца  $\text{PbSO}_4$ , то часть сульфата свинца не может поместиться в ячейках на отрицательном электроде и выпадает в осадок на дно аккумулятора. Это приводит к невозполнимым потерям активного вещества.

2. В некоторых аккумуляторах (например, автомобильных) для прочности сетки электродов делают не из чистого свинца, а из сплава свинца с сурьмой. К сожалению, наличие сурьмы ведет к саморазряду аккумулятора:



Данная реакция достаточно медленно, но необратимо уничтожает активный материал аккумулятора. В аккумуляторах стационарного типа (например, для ветроустановок или осветительных систем) можно применять электроды без сурьмы, что увеличивает срок службы аккумулятора до семи лет.

## 8.6. Электрическое аккумулирование

Электроаккумуляторы делятся на электростатические и индуктивные. Электростатический аккумулятор представляет собой электрический конденсатор, помещенный в вакуум. Индуктивный аккумулятор представляет собой катушку индуктивности с полым сердечником. Сверхпроводящие катушки индуктивности с криогенной системой охлаждения, имеющие активное сопротивление, равное нулю, могут сохранить накопленную энергию в течение 10–12 ч.

Достоинства электрических аккумуляторов – простота, небольшой вес и высококачественная аккумулируемая энергия. Недостатки – низкая плотность и самопроизвольная разрядка.

## 8.7. Механическое аккумулирование

**Гидравлический аккумулятор.** В большой энергетике наибольшее применение получили гидравлические аккумулирующие электростанции (ГАЭС). ГАЭС состоит из двух емкостей, расположенных на разных геометрических высотах и соединенных трубопроводом. В момент зарядки рабочая жидкость (как правило, вода) перекачивается из нижней емкости в верхнюю. В момент разрядки жидкость движется из верхнего резервуара в нижний. Энергия зарядки

$$E = V\rho gH,$$

где  $V$  – объем закачиваемой жидкости;  $H$  – геометрическая высота между свободными уровнями жидкости двух емкостей.

Как видно из уравнения, большой мощности аккумулятора можно достичь либо большим объемом перекачиваемой жидкости, либо большой геометрической высотой между резервуарами. Однако большой объем перекачиваемой жидкости ведет к значительным затратам при создании больших емкостей. А большая геометрическая высота ведет к значительным затратам при строительстве водоводов и подпорных сооружений. Кроме того, основные потери при работе ГАЭС связаны с потерями при прокачке жидкости по водоводам

$$\Delta h = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $v$  – скорость потока;  $l, d$  – длина и диаметр водовода. Длина водовода находится в прямой зависимости от геометрической высоты.

На практике строительство ГАЭС осуществляют около двух естественных водоемов, находящихся на разных геометрических высотах. К сожалению, Беларусь – равнинная страна и на ней нет двух подходящих естественных водоемов. Однако в качестве нижней емкости можно использовать подземные водонепроницаемые резервуары – как натуральные, так и искусственные (например, отработанные шахты солигорского комбината).

Первые ГАЭС имели два водовода: один для зарядки, другой для разрядки. Зарядка осуществлялась насосом, а разрядка – гидравлической турбиной. В настоящее время для снижения затрат при строительстве у ГАЭС имеется один водовод, а насос и турбина объединены в один агрегат. Эксплуатация ГАЭС проста и не требует много персонала. Основные проблемы при эксплуатации ГАЭС возникают зимой, когда при каждой зарядке и разрядке в резервуарах появляется новый слой льда, что может привести к полной остановке ГАЭС.

**Инерционный аккумулятор.** Кинетическая энергия вращающегося тела равна, Дж,

$$E = I\omega^2 / 2,$$

где  $I$  – собственный момент инерции тела относительно его оси вращения, Н·м;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с.

В качестве инерционных аккумуляторов применяют маховики двух типов:

1) в виде диска радиусом  $r$ , у которого собственный момент инерции определяется по формуле  $I = mr^2 / 2$ ;

2) в виде обруча, т. е. когда масса сконцентрирована на периферии маховика, а собственный момент инерции определяется по формуле  $I = mr^2$ .

Для более эффективного использования маховика ему необходимо сообщить максимальную скорость, которая ограничена напряжениями, разрывающими маховик под действием центробежных сил (например, для однородного маховика), Н/м<sup>2</sup>:

$$\sigma_{\max} = \rho \omega^2 r^2,$$

где  $\rho$  – плотность материала.

При этом плотность энергии, запасаемая однородным диском,

$$w = E / m = r^2 \omega^2 / 4 = \sigma_{\max} / (4\rho)$$

зависит от соотношения разрывающего напряжения к плотности материала.

Так, для стального маховика плотность энергии невелика – около 0,03 МДж/кг. Более высокую плотность энергии (около 0,5 МДж/кг) можно получить при использовании стеклокомпозитных материалов, имеющих большее разрывающее напряжение при меньшей плотности.

Преимущество инерционных аккумуляторов: требуют значительно меньшего срока подзарядки, чем другие аккумуляторы; экологически безопасны. Недостатки: высокая стоимость из-за жестких требований к изготовлению; значительная физическая опасность.

**Пневматический аккумулятор.** Аккумуляторы со сжатым газом нашли широкое применение в газотурбинных установках и на выходе компрессионных установок.

Для данного аккумулятора уравнение разрядки ( $dm_{\text{вх}} = 0$ ,  $dV_{\text{ак}} = 0$ ) имеет вид

$$dQ - h_{\text{вых}} dm_{\text{вых}} = d(um)_{\text{ак}}.$$

Поскольку  $h = u + pv$ ,  $u_{\text{вых}} = u_{\text{ак}} = u$ , то  $dQ/V_{\text{ак}} - (pv)d\rho_{\text{ак}} = \rho_{\text{ак}} du$ .  
Для идеального газа

$$dQ/V_{\text{ак}} - (c_p - c_v)Td\rho_{\text{ак}} = c_v \rho_{\text{ак}} dT.$$

Запасенную энергию при сжатии идеального газа можно рассчитать по уравнению

$$E = \int_{V_2}^{V_1} p dV = nRT \int_{V_2}^{V_1} \frac{dV}{V} = p_1 V_1 \ln(V_1 / V_2).$$

## **9. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

В комплексе существующих экологических проблем энергетика занимает одно из ведущих мест. В связи с интенсивным вовлечением возобновляемых источников энергии в практическое использование особое внимание обращается на экологическое воздействие их на окружающую среду.

Существует мнение, что выработка энергии за счет возобновляемых источников экологически безвредна. Это не совсем верно, так как системы на основе этих источников энергии по сравнению с традиционными энергоустановками обладают принципиально иным спектром воздействия на окружающую среду, причем в некоторых случаях воздействия последних представляют даже меньшую опасность. К тому же определенные виды экологического воздействия возобновляемых источников энергии на окружающую среду (особенно во временном аспекте) не ясны до настоящего времени, и поэтому изучены и разработаны еще в меньшей степени, чем технические вопросы использования этих источников.

Преобразование энергии нетрадиционных возобновляемых источников на уровне современных знаний и технологий обходится довольно дорого. Однако во всех случаях их использование приводит к эквивалентному снижению расходов органического топлива и меньшему загрязнению окружающей среды. До настоящего времени во всех методиках, в которых приводится технико-экономическое сопоставление традиционных видов получения энергии с возобновляемыми источниками, эти факторы не учитывались вообще или только отмечались, но не оценивались количественно. Между тем необходима разработка научно обоснованных методов экономической оценки экологических последствий использования различных видов возобновляющихся источников энергии, которые должны количественно учесть факторы иного, по сравнению с традиционными установками, воздействия на окружающую среду.

### **9.1. Последствия развития солнечной энергетики**

Солнечные станции являются еще недостаточно изученными объектами, поэтому отнесение их к экологически чистым электростанциям нельзя назвать полностью обоснованным.

Солнечные станции являются достаточно землеемкими – от 0,001 до 0,006 га/кВт с наиболее вероятными значениями 0,003–0,004 га/кВт. Это меньше, чем для ГЭС, но больше, чем для ТЭС и АЭС. А в случае создания солнечных электростанций с солнечными прудами удельная землеемкость повысится и увеличится опасность загрязнения подземных вод рассолами.

Солнечные концентраторы вызывают большие по площади затенения земель, что приводит к сильным изменениям почвенных условий, растительности и т. д. Нежелательное экологическое действие в районе расположения станции вызывает нагрев воздуха при прохождении через него солнечного излучения, сконцентрированного зеркальными отражателями. Это приводит к изменению теплового баланса, влажности, направления ветров; в некоторых случаях возможны перегрев и возгорание систем, использующих концентраторы, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Применение низкокипящих жидкостей и неизбежные их утечки в солнечных энергетических системах во время длительной эксплуатации могут привести к значительному загрязнению питьевой воды. Особую опасность представляют жидкости, содержащие хроматы и нитриты, являющиеся высокотоксичными веществами.

Гелиофототехника косвенным образом оказывает влияние на окружающую среду. Солнечные электростанции весьма материалоемки (металл, стекло, бетон и т.д.), т. е. необходимо учитывать повреждение земляного покрова на стадиях добычи и обработки сырья для получения необходимых материалов. Во время изготовления кремниевых, кадмиевых и арсенидого依иевых фотоэлектрических элементов в воздухе производственных помещений появляются кремниевая пыль, кадмиевые и арсенидные соединения, опасные для здоровья людей.

Космические солнечные электростанции в случае передаваемой на Землю энергии в виде СВЧ-излучения могут оказывать влияние на климат, создавать помехи теле- и радиосвязи, воздействовать на незащищенные живые организмы, попавшие в зону его влияния. В связи с этим необходимо использовать экологически чистый диапазон волн для передачи энергии на Землю.

Неблагоприятные воздействия солнечной энергии на окружающую среду могут проявляться:

- в отчуждении земельных площадей, их возможной деградации;
- в большой материалоемкости (для строительства солнечной станции потребление стали в 12 раз больше, а бетона в 60 раз больше, чем у ТЭС той же мощности);

- в опасности перегрева и возгорания систем, заражения продуктов токсичными веществами при использовании солнечных систем в сельском хозяйстве;
- в изменении теплового баланса, влажности, направления ветра в районе расположения станции;
- в создании помех телевизионной и радиосвязи;
- в воздействии на климат космических СЭС;
- передаче энергии космических СЭС на Землю в виде микроволнового излучения, опасного для живых организмов и человека.

## **9.2. Последствия использования биоэнергетических установок**

Биоэнергетические станции по сравнению с традиционными электростанциями являются более экологически безопасными. Они способствуют избавлению окружающей среды от загрязнения всевозможными отходами. Так, например, анаэробная ферментация – эффективное средство не только реализации отходов животноводства, но и обеспечения экологической чистоты, так как твердые органические вещества теряют запах и становятся менее привлекательными для грызунов и насекомых (в процессе перегнивания разрушаются болезнетворные микроорганизмы). Кроме того, образуются дополнительный корм для скота (протеин) и удобрения.

Городские стоки и твердые отходы, отходы при рубках леса и деревообрабатывающей промышленности, представляя собой возможные источники сильного загрязнения природной среды, являются в то же время сырьем для получения энергии, удобрений, ценных химических веществ. Поэтому широкое развитие биоэнергетики эффективно в экологическом отношении.

Однако неблагоприятные воздействия на объекты природной среды при энергетическом использовании биомассы имеют место. Прямое сжигание древесины дает большое количество твердых частиц, органических компонентов, окиси углерода и других газов. Во время горения топлива распространяются различные опасные субстанции, например, оксид азота  $\text{NO}_x$  создает азотную кислоту, которая выпадает в виде росы. Это часто является основной причиной гибели лесов, что в итоге приводит к огромным потерям лесной промышленности. Другим экологическим последствием сжигания древесины являются значительные тепловые потери.

Общее основание тех, кто выступает против биотоплива: газы, выделяемые при его сжигании, содержат большое количество тяжелых металлов. Однако ни одно дерево не может создавать тяжелые металлы.



Тяжелые металлы, которые содержатся в отработанном газе биотоплива появляются оттого, что дерево впитывает воду из земли, а в воде металлы появляются в результате сжигания угля и жидкого топлива.

Отработанные газы ископаемых видов топлива имеют низкий pH-показатель; в основном содержание серы и оксидов азота является причиной низкого pH-уровня земли, что, в свою очередь, вызывает «освобождение» тяжелых металлов (например, алюминия и кадмия), и в результате их попадания в воду страдают все живые организмы. При попадании этих металлов в человеческий организм может получить развитие такая болезнь, как «раннее старение» и др.

pH-уровень при сжигании биомассы выше 7, что означает постепенное лечебное воздействие биомассы в борьбе с теми вредными последствиями, которые ископаемые виды топлива вызвали в отношении pH-уровня. В настоящее время проводится исследование, целью которого является найти методы конденсации тяжелых металлов из отработанных газов биотоплива.

По сравнению с древесиной биогаз – более чистое топливо, не производящее вредных газов и частиц. Вместе с тем необходимы меры предосторожности при производстве и потреблении биогаза, так как метан взрывоопасен. Поэтому при его хранении, транспортировке и использовании следует осуществлять регулярный контроль для обнаружения и ликвидации утечек.

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

Неблагоприятные воздействия биоэнергетики на экологию:

- выбросы твердых частиц, канцерогенных и токсичных веществ, окиси углерода, биогаза, биоспирта;
- выброс тепла, изменение теплового баланса;
- обеднение почвенной органики, истощение и эрозия почв;
- взрывоопасность;
- большое количество отходов в виде побочных продуктов (промывочные воды, остатки перегонки).

### **9.3. Последствия развития гидроэнергетики**

Долгое время гидроэнергетику относили к экологически «чистым» источникам энергии. Однако имеется негативное влияние во-

дохранилищных ГЭС на окружающую природную среду и условия проживания людей в зонах влияния. Это проявляется, прежде всего, в затоплении и последствиях подтопления земель. В XX столетии не принимались во внимание экологические последствия использования гидроэнергии и не проводилось достаточных природоохранных мероприятий, что со временем привело к серьезным последствиям.

Однако у малой гидроэнергетики имеются принципиальные различия воздействия на окружающую среду по сравнению с большой гидроэнергетикой. Главное преимущество малых ГЭС перед средними и тем более крупными гидросооружениями заключается в том, что малые гидроузлы более всего отвечают основным критериям оптимальности – удовлетворять потребности человека при минимальном воздействии на окружающую среду. «Экологическая чистота» малых ГЭС проявляется, прежде всего, в гораздо меньших площадях затоплений и подтоплений, плотины и водохранилища малых ГЭС в значительно меньшей степени, чем другие виды энергообъектов, нарушают нормальную естественную среду обитания человека и животного мира. Опыт свидетельствует о том, что строительство средних и крупных водохранилищ привело к сокращению и даже уничтожению некоторых популяций животного мира, попадающих в зоны затоплений и влияния водоемов, что практически исключено при строительстве малых водохранилищ.

И для рыбного хозяйства плотины малых ГЭС менее опасны, чем средних и крупных, перекрывающих миграционные пути рыб к нерестилищу. Хотя в целом создание гидроузлов на реках 3-го, 4-го и последующих порядков не устраняет полностью урон рыбному стаду на основных реках, так как речной бассейн – это единая экологическая система и нарушения ее отдельных звеньев неизбежно отражаются на системе в целом.

Нельзя также забывать, что строительство большого числа водохранилищ малых ГЭС поможет в решении обеспечения водными ресурсами различных отраслей хозяйства в разных частях бассейнов рек. Более эффективное использование водных ресурсов с помощью малых и средних водохранилищ особенно проявляется в маловодные сезоны, что в конечном итоге отражается в благоприятную сторону и на режиме главных рек. Наибольшего же эффекта от внутригодового перераспределения стока малыми водоемами при их массовом строительстве можно ожидать в засушливых районах, где влияние регулирования стока проявляется наиболее отчетливо.

Есть также ряд положительных моментов создания малых искусственных водоемов. Так, расположение водоемов в приводораздельной части бассейнов рек способствует переводу поверхностного стока в подземный и росту почвенной влаги, что подтверждается наблюдениями в европейской части России в настоящее время.

Наряду с перечисленными и многими другими положительными сторонами создания малых ГЭС и их водохранилищ необходимо отметить по-прежнему слабую изученность режима малых рек и влияние малых ГЭС на природную среду, неразработанность методики и поэтому затрудненность прогнозирования многих сторон их воздействия. Например, имеется проблема заиления водохранилищ малых ГЭС, и связанная с этим проблема подъема уровней воды, затоплений и подтоплений земель, снижения гидроэнергетического потенциала рек.

#### **9.4. Последствия развития ветроэнергетики**

Мощные промышленные ветроэнергетические станции (ВЭС) занимают площадь из расчета от 5 до 15 МВт/км<sup>2</sup> в зависимости от розы ветров и местного рельефа района. Для ВЭС мощностью 1000 МВт потребуется площадь от 70 до 200 км<sup>2</sup>. Выделение таких площадей в промышленных регионах сопряжено с большими трудностями, хотя частично эти земли могут использоваться и под хозяйственные нужды.

Использование территории, занятой ветровым парком, для других целей зависит от шумовых эффектов и степени риска при поломках ВЭУ. Опасность использования ветроустановок связано с довольно высокой скоростью вращения концов лопастей ветроколеса (в 4–6 раз выше скорости ветра), что может приводить к разрушению лопастей и гибели птиц. У больших ВЭУ лопасть при отрыве может быть отброшена на 400–800 м.

Наиболее важный фактор влияния ВЭС на окружающую среду – это акустическое воздействие. Имеется достаточно исследований и натурных измерений уровня и частоты шума для различных типов ВЭУ с ветроколесами, отличающимися конструкцией, материалами, высотой над землей, и для разных природных условий (скорость и направление ветра, подстилающая поверхность и т. д.). Шумовые эффекты от ВЭУ имеют разную природу и подразделяются на механические (шум от редукторов, подшипников и генераторов) и аэродинамические воздействия. Последние, в свою очередь, могут быть низкочастотными (менее 16–20 Гц) и высокочастотными (от 20 Гц до несколь-

ких кГц). Они вызваны вращением рабочего колеса и определяются следующими явлениями: образованием разряжения за ротором или ветроколесом с устремлением потоков воздуха в некую точку схода турбулентных потоков; пульсациями подъемной силы на профиле лопасти; взаимодействием турбулентного пограничного слоя с задней кромкой лопасти.

Удаление ВЭС от населенных пунктов и мест отдыха решает проблему шумового эффекта для людей. Однако шум может повлиять на фауну, в том числе на речную. По зарубежным данным, вероятность поражения птиц ветровыми турбинами оценивается в 10%, если пути миграции проходят через ветровую станцию. Следовательно, строительство ВЭС повлияет на пути миграции птиц.

Высказываются предположения, что экранирующее действие ВЭС на пути естественных воздушных потоков будет незначительным и его можно не принимать во внимание. Это объясняется тем, что ВЭУ используют небольшой приземный слой перемещающихся воздушных масс (около 100–150 м), и притом не более 50% их кинетической энергии. Однако мощные ВЭС могут оказать влияние на окружающую среду: например, уменьшить вентиляцию воздуха в районе размещения ветрового парка. Экранирующее действие ветрового парка может оказаться эквивалентным действию возвышенности такой же площади и высотой порядка 100–150 м.

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

Наиболее радикальный способ уменьшения помех – удаление ветрового парка на соответствующее расстояние от коммуникаций. В ряде случаев помех можно избежать, установив ретрансляторы. Этот вопрос не относится к категории трудноразрешимых, и в каждом случае может быть найдено конкретное решение

Неблагоприятные факторы ветроэнергетики:

- шумовые воздействия, электро-, радио- и телевизионные помехи;
- отчуждение земельных площадей;
- локальные климатические изменения;
- опасность для мигрирующих птиц и насекомых;
- ландшафтная несовместимость, непривлекательность, визуальное невосприятие, дискомфортность.

## 9.5. Последствия развития геотермальной энергетики

Основное воздействие на окружающую среду геотермальные электростанции оказывают в период строительства скважин, водопроводов и зданий станций.

Для утилизации геотермальной энергии бурят скважины глубиной от 300 до 2700 м. Для работы станции мощностью 1000 МВт требуется 150 скважин, которые занимают территорию более 19 км<sup>2</sup>. Потенциальным последствием геотермальных разработок является оседание почвы.

На ГеоТЭС не происходит сжигания топлива, поэтому объем отравляющих газов, выбрасываемых в атмосферу, значительно меньше, чем на ТЭС, и они имеют другой химический состав по сравнению с газообразными отходами станций на органическом топливе. Газовые примеси в воде, добываемой из геотермальных скважин, на 80% состоят из двуокиси углерода и содержат небольшую долю метана CH<sub>4</sub>, водорода H<sub>2</sub>, азота N<sub>2</sub>, оксида серы SO<sub>2</sub>, аммиака NH<sub>3</sub> и сероводорода H<sub>2</sub>S. Наиболее вредным является сероводород (содержание около 0,0225%).

Потребность ГеоТЭС в охлаждающей воде (на 1 кВт · ч электроэнергии) в 4–5 раз выше, чем ТЭС, из-за более низкого КПД. Сброс отработанной воды и конденсата для охлаждения в водоемы может вызвать их тепловое загрязнение, а также повышение концентрации солей, в том числе хлористого натрия, аммиака, кремнезема, и таких элементов, как бор, мышьяк, ртуть, рубидий, цезий, калий, фтор, натрий, бром, иод, хотя и в небольших количествах. С ростом глубин скважин возможно увеличение этих поступлений.

Одно из неблагоприятных проявлений ГеоТЭС – загрязнение поверхностных и грунтовых вод в случае выброса растворов высокой концентрации при бурении скважин. Сброс отработанных термальных вод может вызвать заболачивание отдельных участков почвы в условиях влажного климата, а в засушливых районах – засоление. Опасен прорыв трубопроводов, в результате которого на землю могут поступить большие количества рассолов.

ГеоТЭС, имея КПД в 2–3 раза меньше, чем АЭС и ТЭС, дают в 2–3 раза больше тепловых выбросов в атмосферу. В качестве простого пути сокращения воздействий на окружающую среду следует рекомендовать создание круговой циркуляции теплоносителя на ГеоТЭС по системе «скважина – теплоъемные агрегаты – скважина – пласт». Это позволит избежать поступления термальных вод на поверхность

земли, в грунтовые воды и поверхностные водоемы, обеспечить сохранение пластового давления, исключить оседание нагретых пород и любую возможность сейсмических проявлений.

Неблагоприятные экологические воздействия геотермальной энергетики на экологию:

- отчуждение земель;
- изменение уровня грунтовых вод, оседание почвы, заболачивание;
- подвижки земной коры, повышение сейсмической активности;
- выброс тепла в атмосферу или в поверхностные воды;
- сброс отравленных вод и конденсата, загрязненных в небольших количествах аммиаком, ртутью, кремнеземом;
- загрязнение водоносных слоев, засоление почв;
- выбросы больших количеств рассолов при разрыве трубопроводов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Республиканская программа энергосбережения на 2006–2010 годы: утв. Постановлением Совета Министров Респ. Беларусь 2.02.2006 [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2009. – Режим доступа: <http://www.pravo.by>. – Дата доступа: 25.01.2009.
2. Государственная комплексная программа модернизации основных производственных фондов Белорусской энергетической системы, энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов на период до 2011 года: утв. Указом Президента Респ. Беларусь 15.11.2007. [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2009. – Режим доступа: <http://www.pravo.by>. – Дата доступа: 25.01.2009.
3. Ермашкевич, В. Н. Возобновляемые источники энергии Беларуси: прогноз, механизмы реализации: учеб. пособие / В. Н. Ермашкевич, Ю. Н. Румянцева. – Минск: НО ООО «БИП-С», 2004. – 121 с.
4. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
5. Калашников, Н. П. Альтернативные источники энергии / Н. П. Калашников. – М.: О-во «Знание», 1987. – 145 с.
6. Коваленко, Э. П. Возобновляемые источники энергии и возможности их использования в Беларуси / Э. П. Коваленко. – Минск, 1995. – 137 с.
7. Калинин, Ю. Я. Нетрадиционные способы получения энергии / Ю. Я. Калинин, А. Б. Дубинин. – Саратов: СПИ, 1983. – 70 с.
8. Магомедов, А. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии / А. М. Магомедов. – Махачкала: ИПО «Юпитер», 1996. – 245 с.
9. Агеев, В. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: курс лекций / В. А. Агеев // Институт механики и энергетики ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ime.mrsu.ru>. – Дата доступа: 25.01.2009.
10. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: справ. пособие / Л. Д. Богуславский [и др.]; под ред. Л. Д. Богуславского и В. И. Ливчака. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.

11. Бринкворт, Б. Солнечная энергия для человека / пер. с англ. В. Н. Оглоблева; под ред. и предисл. Б. В. Тарнижевского. – М.: Мир, 1976. – 291 с.
12. Солнечные коллекторы на основе полимерных материалов: обзор / С. В. Смирнов [и др.]. – М., 1990. – 44 с.
13. Богословский, В. Н. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В. Н. Богословский, М. Я. Поз. – М.: Стройиздат, 1938. – 320 с.
14. Андреев, В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
15. Бойлс, Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки / Д. Бойлс. – М.: Агропромиздат, 1987.
16. Головков, С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головков, И. Ф. Коперин, В. И. Найденов. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 224 с.
17. Справочник потребителя биотоплива / под ред. Виллу Вареса. – Таллинн: Изд-во Таллиннского технологического университета, 2005. – 182 с.
18. Кнорре, Г. Ф. Что такое горение? / Г. Ф. Кнорре. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 224 с.
19. Роддатис, К. Ф. Котельные установки: учеб. пособие для студентов неэнергетических специальностей вузов / К. Ф. Роддатис. – М.: Энергия, 1977. – 430 с.
20. Лямин, В. А. Газификация древесины / В. А. Лямин – М.: Лесн. пром-сть, 1967. – 263 с.
21. Малая энергетика на биотопливе / А. В. Вавилов [и др.]. – Минск: УП «Техенопринт», 2002. – 248 с.
22. Стриха, И. И. Повышение эффективности топливоиспользования в котельных: монография. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 260 с.
23. Государственная программа «Торф» на 2008–2010 годы и на период до 2020 года: утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь 23.01.2008. [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2009. – Режим доступа: <http://www.pravo.by>. – Дата доступа: 25.01.2009.
24. Проблемы комплексного использования горючих сланцев Белорусской ССР / под ред. И. И. Лиштвана. – Минск: Наука и техника, 1983. – 104 с.



25. Кузнецов Д. Т. Энергохимическое использование горючих сланцев: технико-экономические аспекты / Д. Т. Кузнецов. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.
26. Промышленная микробиология / под ред. Н. С. Егорова. – М.: Высшая школа, 1989. – 688 с.
27. Баадер, В. Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; пер. с нем. – М.: Колос, 1982. – 148 с.
28. Дубровский, В. С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В. С. Дубровский, У. Э. Виестру. – Рига: Зинатне, 1988.
29. Михайлов, Л. П. Малая гидроэнергетика / Л. П. Михайлов, Б. П. Фельдман, Т. К. Марканова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
30. Карелин, В. Я. Сооружение и оборудование малых гидроэлектростанций / В. Я. Карелин, В. В. Волшаник. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
31. Кривченко, Г. И. Гидравлические машины: турбины и насосы: учебник / Г. И. Кривченко. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
32. Использование водной энергии: учеб. пособие. / Д. С. Щавелев, П. Н. Васильев, Ю. С. Васильев; под ред. Д. С. Щавелева. – Л.: Энергия, 1976. – 655 с.
33. Овсепян, В. М. Гидравлический таран и таранные установки / В. М. Овсепян. – М.: Машиностроение, 1968. – 124 с.
34. Фатеев, Е. М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е. М. Фатеев. – М.: ОГИЗ-Сельхозгиз, 1948. – 544 с.
35. Шефтер, Я. И. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты / Я. И. Шефтер, И. В. Рождественский. – М.: Колос, 1967. – 376 с.
36. Васильев, Ю. С. Экология использования возобновляющихся энергоисточников / Ю. С. Васильев, Н. И. Хрисанов; под ред. Д. С. Щавелева. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 343 с.
37. Берман, Э. Геотермальная энергия / Э. Берман; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 192 с.
38. Дворов, И. М. Геотермальная энергетика / И. М. Дворов. – М.: Наука, 1976. – 192 с.
39. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов / под ред. Г. И. Воронина. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
40. Бекман, Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман, П. Гили; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 272 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	6
1.1. Энергия, ее источники и классификация .....	6
1.2. Современное состояние топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь .....	7
1.3. Особенности использования возобновляемых источников энергии .....	10
2. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА .....	13
2.1. Солнечное излучение .....	13
2.1.1. Космическое солнечное излучение.....	13
2.1.2. Влияние земной атмосферы на солнечное излучение...	15
2.1.3. Оптимальная ориентация приемника .....	18
2.2. Тепловой способ использования солнечной энергии.....	22
2.2.1. Гелиоколлектор.....	23
2.2.2. Тепловой баланс гелиоколлектора.....	26
2.2.3. Селективные поверхности.....	28
2.2.4. Конструкции поглощающих панелей .....	30
2.2.5. Концентрирующие гелиоколлектора .....	32
2.2.6. Теплоносители активных гелиосистем и способы их циркуляции .....	35
2.2.7. Виды активных гелиосистем.....	38
2.2.8. Гелиосистема с абсорбером .....	40
2.2.9. Целесообразность применения гелиосистем в Республике Беларусь .....	42
2.2.10. Другие тепловые способы использования солнечной энергии .....	43
2.3. Фотоэлектрическая генерация .....	45
2.3.1. Электропроводимость полупроводников .....	46
2.3.2. Примесная проводимость.....	48
2.3.3. $p-n$ -переход .....	51
2.3.4. Конструкция и недостатки солнечных элементов .....	54
2.3.5. Ограничение эффективности работы солнечных элементов .....	55
2.3.6. Материалы для изготовления фотоэлементов.....	57
2.3.7. Применение солнечной энергии в космосе .....	59
2.4. Прямое использование солнечной энергии.....	60

2.4.1. Световод.....	60
2.4.2. Система оптоволоконного освещения.....	64
2.5. Биологические и химический способы использования солнечной энергии.....	65
<b>3. БИОЭНЕРГЕТИКА.....</b>	<b>67</b>
3.1. Классификация, характеристика и способы сжигания биотоплива .....	67
3.1.1. Биотопливо и его источники .....	67
3.1.2. Характеристика топлива.....	69
3.1.3. Способы переработки биотоплива.....	70
3.1.4. Источники и характеристика древесного топлива.....	71
3.1.5. Отходы животноводства и сельского хозяйства .....	75
3.1.6. Энергетическое топливо.....	76
3.1.7. Твердые бытовые и промышленные отходы .....	77
3.1.8. Торф.....	81
3.1.9. Белорусские горючие сланцы .....	84
3.2. Утилизация древесного топлива.....	86
3.2.1. Установка для сжигания биотоплива.....	86
3.2.2. Этапы сжигания биотоплива .....	87
3.2.3. Технологии сжигания биотоплива.....	91
3.2.4. Особенности сжигания древесного топлива .....	93
3.2.5. Системы утилизации тепла и возможности повышения КПД установки .....	95
3.2.6. Неглубокая переработка топлива.....	96
3.3. Термохимические способы переработки биотоплива .....	100
3.3.1. Пиролиз (сухая перегонка).....	100
3.3.2. Слойная газификация биомассы.....	102
3.3.3. Газификация в кипящем слое .....	107
3.3.4. Уравнение теплового баланса газификации топлива .....	108
3.3.5. Газификация под давлением .....	110
3.3.6. Газификация биотоплива твердым высокотемпературным теплоносителем .....	112
3.3.7. Утилизация золы.....	116
3.3.8. Целесообразность промышленного освоения горючих сланцев в Республике Беларусь.....	118
3.3.9. Другие термохимические способы переработки биомассы.....	119
3.4. Термическая переработка твердых бытовых и промышленных отходов .....	120
3.4.1. Недостатки термической переработки твердых бытовых отходов .....	120

3.4.2. Технологии термической утилизации отходов .....	122
3.5. Анаэробная переработка биотоплива .....	124
3.5.1. Технология анаэробной переработки .....	124
3.5.2. Факторы, влияющие на процесс брожения .....	126
3.5.3. Особенности и методы переработки отходов животно- водства и растениеводства .....	127
3.5.4. Получение биогаза в метантенках .....	129
3.5.5. Методика определения технических параметров ме- тантенка .....	131
3.5.6. Добыча и утилизация свалочного газа.....	132
3.5.7. Подготовка к использованию и аккумулирование биогаза	136
3.5.8. Получение тепловой энергии при аэробном окислении ....	138
3.6. Получение спиртов.....	139
3.6.1. Методы получения спирта .....	139
3.6.2. Использование этанола в качестве топлива .....	142
<b>4. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>143</b>
4.1. Гидроэнергетические ресурсы Республики Беларусь .....	145
4.2. Режимы работы и принципиальные схемы малых ГЭС.....	148
4.3. Типы и основные энергетические параметры гидравличе- ских турбин .....	152
4.3.1. Активные гидротурбины .....	155
4.3.2. Реактивные гидротурбины .....	158
4.3.3. Основное энергетическое уравнение турбины.....	163
4.3.4. Теория подобия лопастных турбин.....	165
4.3.5. Эксплуатация турбин.....	167
4.3.6. Выбор типа турбины.....	168
4.4. Гидравлический таран.....	171
4.4.1. Явление гидравлического удара .....	171
4.4.2. Конструкция и принцип действия гидравлического тарана.	174
4.4.3. Теория расчета и область применения гидравлическо- го тарана.....	175
<b>5. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>177</b>
5.1. Происхождение ветра.....	177
5.2. Потенциал энергии ветра в Республике Беларусь .....	179
5.3. Структурная схема лопастной ветроэлектрической установ- ки и ее основные технические параметры.....	180
5.4. Работа поверхности при действии на нее силы ветра .....	181
5.5. Теория идеального лопастного ветроколеса .....	183
5.6. Работа ветрового колеса крыльчатого ветродвигателя .....	186

5.7. Классификация ветродвигателей по принципу работы .....	188
5.8. Причины недостаточной эффективности работы ветроустановок и способы ее повышения .....	190
5.9. Эффект Магнуса .....	192
5.10. Целесообразность использования энергии ветра в Республике Беларусь .....	195
<b>6. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>197</b>
6.1. Тепловой режим земной коры .....	198
6.2. Использование тепла горячих земляных пластов.....	198
6.3. Тепловая труба.....	201
6.3.1. Конструкция и принцип действия.....	202
6.3.2. Энергетический баланс .....	204
6.3.3. Области работы.....	205
6.3.4. Способы регулирования теплопередачи.....	206
6.4. Подземные термальные воды (гидротермы).....	207
<b>7. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....</b>	<b>209</b>
7.1. Характеристики электрического поля Земли.....	209
7.2. Технология использования электрического поля Земли.....	210
<b>8. АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ .....</b>	<b>215</b>
8.1. Цель аккумулирования энергии.....	215
8.2. Энергетический баланс аккумулятора .....	216
8.3. Тепловое аккумулирование энергии .....	217
8.3.1. Типы тепловых аккумуляторов .....	219
8.3.2. Аккумулирование в системах солнечного отопления ...	221
8.4. Теплохимическое аккумулирование .....	223
8.5. Электрохимическое аккумулирование.....	224
8.6. Электрическое аккумулирование .....	226
8.7. Механическое аккумулирование .....	226
<b>9. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....</b>	<b>229</b>
9.1. Последствия развития солнечной энергетики .....	229
9.2. Последствия использования биоэнергетических установок ..	231
9.3. Последствия развития гидроэнергетики .....	232
9.4. Последствия развития ветроэнергетики.....	234
9.5. Последствия развития геотермальной энергетики .....	236
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>238</b>

Учебное издание

**Сухоцкий** Альберт Борисович  
**Фарафонов** Валерий Николаевич

**НЕТРАДИЦИОННЫЕ  
И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ  
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Курс лекций

Редактор *Р. М. Рябая*  
Компьютерная верстка *О. Ю. Шантарович*

Подписано в печать 26.06.2009. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 14,3. Уч.-изд. л. 14,8.  
Тираж 70 экз. Заказ .

Учреждение образования  
«Белорусский государственный технологический университет».  
220006. Минск, Свердлова, 13а.  
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет».  
220006. Минск, Свердлова, 13.  
ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.