

# СОДЕРЖАНИЕ

## Введение

### **1. Состояние и перспективы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии**

- 1.1. Традиционные и нетрадиционные источники энергии
- 1.2. Политика России в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Запасы и динамика потребления энергоресурсов
- 1.3. Основные объекты нетрадиционной энергетики России
  - 1.3.1. Общие сведения
  - 1.3.2. Геотермальная энергетика
  - 1.3.3. Малые ГЭС
  - 1.3.4. Ветроэнергетика
  - 1.3.5. Биоэнергетика
  - 1.3.6. Солнечная энергетика
  - 1.3.7. Приливная энергетика
- 1.4. Развитие альтернативной энергетики в мире по итогам 2010 г

### **2. Преобразование солнечной энергии в электрическую**

- 2.1. Интенсивность солнечного излучения
- 2.2. Фотоэлектрические свойства  $p$ - $n$ -перехода
- 2.3. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента
- 2.4. Конструкции и материалы солнечных элементов

### **3. Системы солнечного теплоснабжения**

- 3.1. Классификация и основные элементы гелиосистем
- 3.2. Плоские солнечные коллекторы
- 3.3. Концентрирующие гелиоприемники

### **4. Тепловое аккумулирование энергии**

- 4.1. Энергетический баланс теплового аккумулятора
- 4.2. Классификация аккумуляторов тепла
- 4.3. Системы аккумулирования
- 4.4. Тепловое аккумулирование за счет изменения градиента концентрации соли и использования теплоты фазового перехода
- 4.5. Бойлеры для гелиотехнологий
  - 4.5.1. Бивалентные бойлеры для приготовления горячей расходной воды
  - 4.5.2. Бивалентные термосифонные бойлеры для приготовления горячей расходной воды

### **5. Энергия ветра и возможности ее использования**

- 5.1. Происхождение ветра, ветровые зоны России
- 5.2. Характеристики ветра
- 5.3. Классификация ветродвигателей по принципу работы и их основные характеристики
- 5.4. Конструкция и основные типы горизонтально-осевых ветротурбин
- 5.5. Конструкция и основные типы вертикально-осевых ветротурбин

### **6. Теория идеального ветряка**

- 6.1. Понятие идеального ветряка
- 6.2. Классическая теория идеального ветряка

## **7. Теория реального ветряка**

7.1. Работа элементарных лопастей ветроколеса. Первое уравнение связи

7.2. Второе уравнение связи

7.3. Момент и мощность всего ветряка

7.4. Потери ветряных двигателей

## **8. Тепловой режим земной коры. Источники геотермального тепла**

8.1. Тепловой режим земной коры

8.2. Подземные термальные воды (гидротермы)

8.3. Запасы и распространение термальных вод

8.4. Состояние геотермальной энергетики в России

## **9. Использование геотермальной энергии для выработки тепловой и электрической энергии**

9.1. Прямое использование геотермальной энергии

9.2. Геотермальные электростанции с бинарным циклом

9.3. Схема Паужетской ГеоТЭС

## **10. Использование геотермальной энергии для теплоснабжения жилых и производственных зданий.**

10.1. Основы построения схем и выбора оборудования геотермальных систем теплоснабжения

10.2. Принципиальные схемы простейших систем геотермального теплоснабжения

10.2.1. Открытые системы геотермального теплоснабжения

10.2.2. Закрытые системы геотермального теплоснабжения

10.3. Принципиальные схемы систем геотермального теплоснабжения с повышенной эффективностью

10.3.1. Бессливная система геотермального теплоснабжения

10.3.2. Система геотермального теплоснабжения с тепловыми насосами

10.3.3. Комплексная система геотермального теплоснабжения

## **11. Энергетические ресурсы океана**

11.1. Баланс возобновляемой энергии океана

11.2. Основы преобразования энергии волн

11.3. Преобразователи энергии волн

11.3.1. Преобразователи, отслеживающие профиль волны

11.3.2. Преобразователи, использующие энергию колеблющегося водяного столба

11.3.3. Подводные устройства

## **12. Использование энергии приливов и морских течений**

12.1. Общие сведения об использовании энергии приливов

12.2. Мощность приливных течений и приливного подъема воды

12.3. Использование энергии океанских течений

12.4. Общая характеристика технических решений

## **13. Преобразование тепловой энергии океана**

13.1. Ресурсы тепловой энергии океана

13.2. Схема ОТЭС, работающей по замкнутому циклу

13.3. Схема ОТЭС, работающей по открытому циклу

13.4. Использование перепада температур океан-атмосфера

13.5. Прямое преобразование тепловой энергии

## **14. Технология получения биотоплива**

## 14.1. Сжигание

### 14.1.1. Общие сведения

### 14.1.2. Подготовка биомассы к сжиганию

### 14.1.3. Методы сжигания

## 14.2. Пиролиз, газификация и сжижение

### 14.2.1. Пиролиз (сухая перегонка)

### 14.2.2. Окислительная газификация

### 14.2.3. Сжижение биомассы

## 14.3. Гидролиз, ферментация и перегонка

### 14.3.1. Гидролиз

### 14.3.2. Ферментация

### 14.3.3. Перегонка

## 14.4. Растительные масла

# **15. Получение и использование биогаза**

### 15.1. Сырье для производства биогаза

### 15.2. Биохимия и микробиология процесса анаэробного сбраживания

### 15.3. Факторы, влияющие на процесс анаэробного сбраживания

#### 15.3.1. Свойства сырья

#### 15.3.2. Температура процесса

#### 15.3.3. pH, буферные свойства среды в биореакторе

#### 15.3.4. Доза загрузки

#### 15.3.5. Продолжительность брожения

#### 15.3.6. Перемешивание

#### 15.3.7. Ингибиторы процесса

# **16. Биоэнергетические установки**

### 16.1. Основные узлы и системы биореакторов

### 16.2. Установки для производства биогаза

### 16.3. Эксплуатация биоэнергетических установок

### 16.4. Использование продуктов метанового брожения

# **17. Использование вторичных энергоресурсов**

### 17.1. Классификация вторичных энергоресурсов

### 17.2. Горючие вторичные энергоресурсы

### 17.3. Тепловые отходы

### 17.4. Вторичные энергоресурсы избыточного давления

# **18. Экологические проблемы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии**

### 18.1. Проблема взаимодействия энергетики и экологии

### 18.2. Экологические последствия развития солнечной энергетики

### 18.3. Влияние ветроэнергетики на природную среду

### 18.4. Возможные экологические проявления геотермальной энергетики

### 18.5. Экологические последствия использования энергии океана

### 18.6. Экологическая характеристика использования биоэнергетических установок

# **Заключение**

# **Список использованных источников**

## ВВЕДЕНИЕ

Энергия – не только одно из обсуждаемых сегодня понятий; помимо своего основного физического (а в более широком смысле – естественно-научного) содержания, оно имеет многочисленные экономические, технические, политические и иные аспекты.

Человечеству нужна энергия, причем потребности в ней увеличиваются с каждым годом. Вместе с тем запасы традиционного природного топлива (нефти, угля, газа и др.) конечны. Остаются два пути: ресурсосбережение и использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Помимо этого, энергетика является одним из главных загрязнителей воздуха. Электростанции, работающие на традиционных видах топлива, вносят до 30 % объема вредных выбросов атмосферы, загрязняют землю и воду продуктами сгорания и сточными водами. Выделяющиеся газы в значительной степени связаны с парниковым эффектом, катастрофические последствия которого мировое сообщество пытается предотвратить сегодня с помощью механизмов Киотского протокола.

К новым формам первичной энергии в первую очередь относятся: солнечная и геотермальная энергия, приливная, энергия ветра и энергия волн. В отличие от ископаемого топлива эти формы энергии не ограничены геологически накопленными запасами. Это означает, что их использование и потребление не ведет к неизбежному исчерпанию запасов.

Предлагаемый курс «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» предоставляет необходимую информацию по проблемам энергетики, не связанной со сжиганием топлива.

Хозяйственная деятельность человека сопряжена с расходом громадного количества органического топлива, накопленного природой за миллионы лет эволюции. Значительную часть потребляемых в мире топливно-энергетических ресурсов использует энергетика – базовая отрасль современной экономики.

Сжигание органического топлива приводит к опасным экологическим по-

следствиям: загрязнению атмосферы диоксидом серы, оксидами азота, несгоревшими углеводородами, золой и сажой. Выбросы углекислоты или диоксида углерода  $\text{CO}_2$  приводят к парниковому эффекту, потеплению климата планеты и повышению уровня Мирового океана с затоплением прибрежных участков суши. Проблема усугубляется вырубкой леса – основного переработчика углекислого газа в атмосфере Земли.

Альтернативой сжиганию органического топлива считается атомная энергетика. Во Франции более 70 % потребляемой электроэнергии производится на АЭС, в Бельгии – около 60 % (в России – 15 %). Ядерное топливо, применяемое в широко распространенных реакторах на тепловых нейтронах, – это уран. Он тоже исчерпаем. Кроме этого, не до конца решена проблема хранения и переработки радиоактивного отработавшего ядерного топлива.

Наука работает над освоением термоядерной энергии синтеза легких элементов, что дало бы человечеству неограниченные энергоресурсы. Сырьем для этого синтеза является дейтерий – нуклид водорода с атомной массой равной двум. В природе на каждые 10 000 атомов обычного водорода приходится один атом дейтерия; энергия дейтерия, содержащегося в одном литре воды, эквивалентна 300 литрам бензина. Запасы дейтерия в океане громадны. Однако до настоящего времени реакция термоядерного синтеза эффективно реализована только в водородной бомбе. Для осуществления этой реакции необходимы очень высокие температуры – сотни миллионов градусов, что пока не позволяет применить управляемый термоядерный синтез в энергетике. Международным консорциумом с участием российских ученых и инженеров разрабатываются энергетические установки с управляемым термоядерным синтезом, однако трудно ожидать успешного завершения этих работ в ближайшие годы.

В традиционной энергетике заметную роль играют гидроэлектростанции. В России до 18 % электроэнергии производится на ГЭС (в Германии – около 1 %). Гидростанции работают на возобновляемом энергоносителе – убыль воды в водохранилище восполняется атмосферными осадками. В Советском Союзе построены крупные ГЭС на полноводных реках – Волге, Енисее,

Ангаре. ГЭС особенно эффективны на реках с большим расходом воды и при больших перепадах высот (напорах). В равнинных местностях, например в Поволжье, их строительство приводит к затоплению водохранилищами больших площадей земли, которые таким образом выводятся из хозяйственного землепользования (поэтому так мала доля ГЭС в энергетике густонаселенной Западной Европы).

Строительство крупных ГЭС влечет ряд неблагоприятных экологических последствий. Высокие плотины вызывают подъем уровня воды в водохранилище, что приводит к заболачиванию берегов. В местах с сухим климатом подъем грунтовых вод, выносящих на поверхность растворенные соли, способствует засолению почв. В стоячей воде водохранилища накапливаются взвешенные твердые частицы, происходит заиливание. При штормовых ветрах волнение поднимает ил в верхние слои, загрязнение воды губительно для рыбы. Неблагоприятно сказываются на речных живых организмах и попуски воды при пусках и остановках гидроагрегатов. Ледовый покров в водохранилищах вскрывается в среднем на две недели позже, чем это было в реке до строительства ГЭС, соответственно задерживаются сроки начала речной навигации. Наконец, накопление масс воды в водохранилище изменяет сложившееся за геологические эпохи равновесие в земной коре. Разрушение плотин при землетрясениях или по другим причинам чревато катастрофическими последствиями.

В связи с сокращением природных запасов традиционных энергоносителей (нефти и природного газа), ростом цен на них, возникновением экологических проблем мировая экономика все больше уделяет внимание поиску и освоению нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ). Разрабатываются меры экономической поддержки НВИЭ: налоговые, кредитные и тарифные льготы, правовая поддержка, государственные программы развития.

Основной недостаток НВИЭ – низкие плотности энергии. Так, для ветровых, солнечных, геотермальных установок характерны плотности энергии менее  $1 \text{ кВт/м}^2$ , тогда как в современных котлах и ядерных реакторах достигаются в тысячу раз большие плотности теплового потока. Соответственно нетрадиционные энергоустановки имеют значительные габариты, металлоемкость, зани-

мают существенные площади по сравнению с действующими ТЭС, АЭС, котельными.

В России практическое применение НВИЭ отстает от мирового уровня. Основным препятствием для их освоения являются малые удельные мощности установок, высокие капитальные затраты, низкий уровень государственной поддержки. Рост инвестиций в это направление энергетики сдерживается пока отсутствием платежеспособного спроса. В ближайшем будущем доля НВИЭ в энергетическом балансе России, несомненно, будет увеличиваться.

# **1. Состояние и перспективы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии**

## **1.1. Традиционные и нетрадиционные источники энергии**

При существующем уровне научно-технического прогресса энергопотребление может быть покрыто лишь за счет использования органических топлив (уголь, нефть, газ), гидроэнергии и атомной энергии на основе тепловых нейтронов. Однако, по результатам многочисленных исследований органическое топливо к 2020 г. может удовлетворить запросы мировой энергетики только частично. Остальная часть энергопотребности может быть удовлетворена за счет других источников энергии – нетрадиционных и возобновляемых.

**Возобновляемые источники энергии** – это источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Возобновляемая энергия не является следствием целенаправленной деятельности человека, и это является ее отличительным признаком.

**Невозобновляемые источники энергии** – это природные запасы веществ и материалов, которые могут быть использованы человеком для производства энергии. Примером могут служить ядерное топливо, уголь, нефть, газ. Энергия невозобновляемых источников в отличие от возобновляемых находится в природе в связанном состоянии и высвобождается в результате целенаправленных действий человека.

В соответствии с резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН №33/148 «Конференция ООН по новым и возобновляемым источникам энергии» от 20.12.1978 г. к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии относятся: солнечная энергия; геотермальная энергия; энергия ветра; энергия света; энергия приливов и отливов; энергия волн и термального градиента моря; энергия преобразования биомассы; энергия, получаемая за счет сжигания топливной древесины, древесного угля, торфа, горючих сланцев, битуминозных песчаников; энергия использования тяглового скота и гидроэнергия.

Начиная с 1990-х гг. по инициативе ЮНЕСКО при поддержке государств-членов ООН и заинтересованных организаций, проводятся мероприятия по продвижению идеи широкого использования возобновляемых источников.

## **1.2. Политика России в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Запасы и динамика потребления энергоресурсов**

Распоряжением Правительства Российской Федерации №1715-р от 13 ноября 2009 г. Утверждена «Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.» [23]. Одним из направлений данного документа является рассмотрение возможностей использования возобновляемых источников энергии. В качестве приоритетных направлений научно-технического прогресса могут быть выделены следующие:

- а) развитие технологий использования возобновляемых источников энергии, а также многофункциональных энергетических комплексов для автономного энергообеспечения потребителей в районах, не подключенных



- к сетям централизованного энергоснабжения;
- б) освоение эффективных технологий сетевого электро- и теплоснабжения на базе возобновляемых источников энергии;
  - в) отработка технологий комбинированного использования возобновляемых источников энергии, а также технологий компенсации неравномерности выдачи мощности генерирующими объектами на основе энергии ветра и приливов;
  - г) разработка и освоение технологий применения современных материалов при производстве оборудования и компонентов для генерирующих объектов на базе возобновляемых источников энергии с целью снижения стоимости их строительства и повышения эффективности функционирования;
  - д) расширение производства и использования новых видов топлива, получаемых из различных видов биомассы.

Прогнозный топливно-энергетический баланс России на период до 2030 г. (таблица 1.1) предусматривает:

- а) снижение доли газа в потреблении первичных топливно-энергетических ресурсов с 52 % в 2005 г. до 46–47 % к 2030 г.;
- б) увеличение доли нетопливных источников энергии в потреблении первичных топливно-энергетических ресурсов с 11 % до 13–14 % к 2030 г.;
- в) масштабное снижение удельной энергоемкости экономики и энергетики (в 2,1–2,3 раза) при незначительном росте внутреннего потребления (в 1,4–1,6 раза), экспорта (в 1,1–1,2 раза) и производства энергоресурсов (в 1,3–1,4 раза).

Стратегическими целями использования возобновляемых источников энергии и местных видов топлива являются:

- а) снижение темпов роста антропогенной нагрузки на окружающую среду и противодействие климатическим изменениям при необходимости удовлетворения растущего потребления энергии;
- б) рациональное использование и снижение темпов роста потребления имеющихся ресурсов ископаемого топлива в условиях неизбежного истощения его запасов;
- в) сохранение здоровья населения и качества жизни путем замедления темпов роста загрязнения окружающей среды при использовании ископаемого топлива, а также снижение общегосударственных расходов на здравоохранение;
- г) замедление темпов роста затрат на распределение и транспортировку электрической энергии и топлива и возникающих при этом потерь;
- д) вовлечение в топливно-энергетический баланс дополнительных топливно-энергетических ресурсов;
- е) повышение уровня энергетической безопасности и надежности энергоснабжения за счет увеличения уровня его децентрализации.

Таблица 1.1

**Прогнозный топливно-энергетический баланс России на период до 2030 г.**

	2005 г. (факт)	2008 г. (факт)	1-й этап (2015 г.)	2-й этап	3-й этап (2030 г.)
Внутреннее потребление (млн т.у.т.), в том числе из общего потребления (млн. т.у.т.):	949	991	1008 – 1107	1160 – 1250	1375 – 1565
газ;	495	526	528 – 573	592 – 619	656 – 696
жидкие (нефть и конденсат);	181	187	195 – 211	240 – 245	309 – 343
твердое топливо (уголь и прочее);	167	175	168 – 197	198 – 238	248 – 302
нетопливные	106 (11,2%)	103 (10,4%)	117–127 (11,5-11,6%)	130–147 (11,2-11,8 %)	163–224 (11,8-14,3%)
Вывоз (млн т.у.т.), в том числе:	865	883	913 – 943	978 – 1013	974 – 985
СНГ,	177	162	172 – 175	174 – 179	153 – 171
из них газ;	110	91	101 – 103	100 – 105	90 – 106
дальнее зарубежье,	688	720	741 – 768	804 – 834	803 – 832
из них газ.	184	190	210 – 235	281 – 287	311 – 317
Прирост запасов (млн т.у.т.)	-1	10	2	2	3
Итого расход (млн т.у.т.)	1813	1884	1923–2052	2140–2266	2363–2542
Ресурсы (млн т.у.т.), в том числе:	1813	1884	1923–2052	2140–2266	2363–2542
импорт,	80	83	96 – 100	92 – 93	86 – 87
из них газ.	64	64	76 – 80	79 – 80	80 – 81
Производство – всего (млн т.у.т.)	1733	1803	1827–1952	2047–2173	2276–2456
из общего производства (млн. т.у.т.):					
газ	736,5	760,9	784 – 853	919 – 958	1015 – 1078
жидкие (нефть и конденсат)	667,2	694,2	691 – 705	718 – 748	760 – 761
твердое топливо (уголь и прочее)	202,8	221,8	212 – 260	246 – 311	282 – 381
нетопливные	126,5 (7,3%)	126,1 (7,0%)	134 – 140 (6,9–7,7%)	156 – 164 (7,2–8,0%)	219 – 236 (9,5–9,6%)

По существующим оценкам, технический потенциал возобновляемых источников энергии, преобладающую долю в котором имеет потенциал использования энергии солнца и энергии ветра, составляет не менее 4,5 млрд тонн условного топлива в год (табл. 1.2), что более чем в 4 раза превышает объем потребления всех топливно-энергетических ресурсов России (около 1 млрд т.у.т. в год.). Экономический потенциал возобновляемых источников энергии зависит от существующих экономических условий, стоимости, наличия и качества запасов ископаемых топливно-энергетических ресурсов, а также региональных особенностей. По оценке специалистов ОАО «Инженерный центр ЕЭС суммарный потенциал возобновляемых источников энергии в России находится

в пределах 320 млн т.у.т./год, что составляет 30 % потребности в электроэнергии. Фактически используется 21 млн т.у.т./год (6,6 % от возможного) [24]. Доля альтернативной энергетики в энергетическом балансе России остается на уровне 1 % [25].

Таблица 1.2

**Энергетический потенциал нетрадиционных возобновляемых источников энергии  
в России, млн т.у.т.**

Виды НВИЭ	Валовой потенциал	Технический потенциал	Экономический потенциал
Малая гидроэнергетика	360	125	65
Геотермальная энергия	(*)	(*)	115(**)
Энергия биомассы	$10 \cdot 10^3$	53	35
Энергия ветра	$26 \cdot 10^3$	2000	10
Солнечная энергия	$2,3 \cdot 10^6$	2300	12,5
Низкопотенциальное тепло (***)	525	105	31,5
Всего по НВИЭ	$2,3 \cdot 10^6$	4583	269

П р и м е ч а н и е:

(\*) По приближенной оценке ресурсы геотермальной энергии в верхней толще глубиной до 3 км составляют около  $180 \cdot 10^6$  млн т.у.т., а пригодные для использования – примерно  $20 \cdot 10^6$  млн т.у.т.

(\*\*) В качестве экономического потенциала взята оценка запасов первоочередного освоения геотермальных вод и парогидротерм с использованием геодинамической технологии.

(\*\*\*) Низкопотенциальная энергия земли, воздуха и воды, промышленных и бытовых стоков.

В целом государственная политика в сфере использования возобновляемых источников энергии на период до 2030 г. будет предусматривать:

- а) координацию мероприятий в области развития электроэнергетики и возобновляемой энергетики;
- б) рациональное применение мер государственной поддержки развития возобновляемой энергетики, в том числе путем оплаты электрической энергии, произведенной с использованием возобновляемых источников энергии, при ее реализации на оптовом рынке, с учетом надбавок к равновесной цене оптового рынка, а также путем возмещения платы за технологическое присоединение к сетям;
- в) разработку комплекса мер по государственной поддержке промышленности и научных институтов для обеспечения отрасли возобновляемых источников энергии российским оборудованием, комплектующими и передовыми технологиями, в том числе с использованием трансфера технологий и локализации на российских предприятиях производства комплектующих для электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии;
- г) создание благоприятных условий для привлечения внебюджетных инвестиций с целью сооружения новых и реконструкции существующих генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии, и использование механизма венчурных фондов для инвестирования в объекты возобновляемой энергетики;

- д) поддержку развития малых предприятий, функционирующих на рынке энергетического сервиса в сфере возобновляемой энергетики;
- е) обеспечение доступности информации о формировании и реализации мероприятий по развитию возобновляемой энергетики;
- ж) осуществление технического и технологического контроля и надзора за соблюдением требований безопасности при использовании возобновляемых источников энергии.

Прогноз поэтапного развития производства электроэнергии на период до 2030 г. представлен в табл. 1.3. Прогноз поэтапного изменения установленной мощности электростанций России с учетом генерирующих объектов, использующих возобновляемые источники энергии, и гидроаккумулирующих электростанций на период до 2030 г. представлен в табл. 1.4. В табл. 1.5 представлен прогноз необходимых инвестиций в развитие топливно-энергетического комплекса и энергоснабжение экономики России на период до 2030 г.

Таблица 1.3

**Прогноз поэтапного развития производства электроэнергии на период до 2030 г**

	2005 г. (факт)	2008 г. (факт)	1-й этап (2013 г.)	2-й этап	3-й этап (2030 г.)
Потребление электроэнергии, внутренний спрос, (млрд. кВт. ч)	941	1021	1041–1218	1315–1518	1740–2164
Производство электроэнергии - всего (млрд. кВт.ч)	953	1037	1059–1245	1350–1555	1800–2210
в том числе:					
атомные электростанции	149	163	194 – 220	247 – 282	356 – 437
генерирующие объекты, использующие возобновляемые источники энергии, и гидроаккумулирующие электростанции	175 (18,3 %)	167,5 (16,1 %)	181 – 199 (16,0–17,1 %)	224 – 240 (15,4–16,6 %)	319 – 422 (17,7–19,1 %)
конденсационные электростанции	277	322	299 – 423	432 – 592	620 – 873
теплоэлектроцентрали	352	385	385 – 403	441 – 447	478 – 505

Таблица 1.4

**Прогноз поэтапного изменения установленной мощности электростанций России по видам генерации на период до 2030 г., млн кВт**

	2005 г. (факт)	2008 г. (факт)	1-й этап (2015 г.)	2-й этап	3-й этап (2030 г.)
Установленная мощность – всего,	216,3	224,9	239 – 267	275 – 315	355 – 445
в том числе:					
генерирующие объекты, использующие возобновляемые источники энергии, и гидроаккумулирующие электростанции	46,2	47,2	55 – 59	66 – 73	91 – 129

Положительным фактором для развития НВИЭ в России является начавшееся создание законодательной базы. В 1996 г. Законом «Об энергосбережении» установлена правовая основа применения электрогенерирующих установок на НВИЭ, состоящая в праве независимых производителей этой электроэнергии на подсоединение к сетям энергоснабжающих организаций.

Таблица 1.5

**Прогноз необходимых инвестиций в развитие топливно-энергетического комплекса и энергоснабжение экономики России на период до 2030 г., млрд долл. США, в ценах 2007 г.**

Направление	1-й этап (2015 г.)	2-й этап	3-й этап (2030 г.)	2009–2030 гг. всего
Сферы энергоснабжения – всего в том числе:	85 – 98	125 – 142	329 – 356	547 – 588
возобновляемые источники энергии (за исключением гидроэлектростанций мощностью более 25 МВт)	7 – 9	24 – 28	82 – 97	113 – 134
Итого на реализацию Стратегии	534 – 554	516 – 665	1308 – 1552	2366 – 2765

В 1999 г. Государственной Думой и Советом Федерации был принят Закон «О государственной политике в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии». Однако в дальнейшем он был отклонен Президентом РФ (25 ноября 1999 г.). Попытки разработать новый законопроект начались в 2004 г. по инициативе РАО «ЕЭС России» в связи с отсутствием нормативных и регламентирующих документов для практической реализации проектов по НВИЭ. Предполагается разработка документов двух уровней: федерального и отраслевого. В первом случае – это проект закона о возобновляемых источниках энергии, предусматривающий систему мер поддержки возобновляемой энергетики. Во втором – документы по изысканиям, проектированию, экспертизе проектов станций и агрегатов, правила их эксплуатации, правила их присоединения к сетям общего пользования, уточнения расчетов и обоснования тарифов и т.д. Разработка документов ведется под контролем Федеральной гидрогенерирующей компании ОАО «ГидроОГК», созданной в декабре 2004 г. рамках реформирования российской электроэнергетики (одной из задач компании является развитие в России энергетики на базе возобновляемых источников энергии).

16 октября 2007 г. Государственная Дума во 2-м и 3-м чтении приняла законопроект, а Совет Федерации 25 октября одобрил закон о завершении реформирования электроэнергетики [19]. Закон «О внесении изменений в некоторые законодательные акты РФ в связи с осуществлением мер по реформированию Единой энергетической системы России» направлен на уточнение норм законов «Об электроэнергетике», «Об особенностях функционирования электроэнергетики в переходный период и о внесении изменений в некоторые законодательные акты РФ и признании утратившими силу некоторых законодательных актов РФ в связи с принятием федерального закона «Об электроэнергетике», а также закона «О государственном регулировании тарифов на электриче-

скую и тепловую энергию в РФ».

В Закон вошли основные положения законопроекта о возобновляемой энергетике, который готовился РАО ЕЭС (ГидроОГК). Так, теперь стоимость подключения генераторов ВИЭ к сетям будет компенсироваться из специального федерального фонда поддержки ВИЭ. В каком виде будет создан этот фонд и как будет формироваться его бюджет – пока неясно. Также поправки к Закону предусматривают введение специальных надбавок-премий к рыночному тарифу, которые будут выплачиваться генераторам электроэнергии от возобновляемых источников энергии, чья мощность менее 25 МВт [19].

28 декабря 2010 г. Президент РФ подписал закон, вносящий изменения в ФЗ «Об электроэнергетике», позволяющие заключать долгосрочные договора купли-продажи мощности, произведённой на объектах с использованием ВИЭ, по особой цене, регулируемой оптовым рынком. Несмотря на то, что эти документы создают определённую инфраструктуру для развития ВИЭ в России, подобных мер в данном случае недостаточно. Так и не рассмотрен в Государственной Думе проект закона о мерах государственной поддержки использования ВИЭ в РФ, подготовленный ОАО «Русгидро» совместно с другими экспертами в этой области. ОАО «Русгидро», на которое Правительство РФ возложило функции по развитию всей возобновляемой энергетики, а не только гидроэлектростанций, не имеет пока достаточно собственных средств для реализации проектов по альтернативной энергетике. На сегодняшний день компания реализует совместно с региональными властями всего четыре таких проекта:

- а) бинарный энергоблок на Паужетской ГеоЭС в Камчатском крае мощностью 2,5 МВт;
- б) увеличение установленной мощности той же ГеоЭС за счёт использования вторичного тепла до 13 МВт;
- в) северная приливная станция в Мурманской области мощностью 12 МВт;
- г) Дальневосточная ветроэлектростанция в Приморском крае мощностью 36 МВт.

### **1.3. Основные объекты нетрадиционной энергетики России**

#### ***1.3.1. Общие сведения***

Остановимся теперь подробнее на действующих и строящихся энергоустановках возобновляемой энергетики. На рис. 1.1 приведена карта России с указанием на ней мест расположения наиболее крупных объектов возобновляемой энергетики.

#### ***1.3.2. Геотермальная энергетика***

Россия располагает большими потенциальными запасами геотермальной энергии в виде парогидротерм вулканических районов и энергетических термальных вод с температурой 60–200 °С в платформенных и предгорных районах. В 1967 г. на южной оконечности Камчатки была создана первая в стране Паужетская ГеоТЭС мощностью 5 МВт, доведенная впоследствии до мощности

11 МВт. Пробуренные в Паужетской геотермальной системе несколько десятков скважин в суммарном объеме производят пароводяную смесь в количестве, достаточном для расширения Паужетской ГеоТЭС до 25 МВт.



**Рис. 1.1. Расположение объектов нетрадиционной и возобновляемой энергетики на территории России**

Экономический кризис 1990-х гг. сказался и на сфере использования НВИЭ. Несмотря на это удалось сохранить научно-технический потенциал и освоить выпуск новой продукции. Так на ОАО «Калужский турбинный завод» производятся конденсационные блок-модульные ГеоТЭС мощностью 4 и 20 МВт. Три таких блока «Туман-4К» по 4 МВт смонтированы на Верхне-Мутновской ГеоТЭС на Камчатке. В качестве теплоносителя используется пар Мутновского месторождения давлением 0,8 МПа. Строительство Верхне-Мутновской ГеоТЭС было начато в 1995 г. и завершено в 1999 г. В настоящее время мощность введенной в эксплуатацию ГеоТЭС составляет 12 МВт.

На Мутновской ГеоТЭС, проектная мощность которой составляет 80 МВт, будут установлены 4 энергомодуля «Камчатка-20» мощностью по 20 МВт. Строительство ГеоТЭС начато в 1992 г. на 2 площадках, на каждой из которых располагается главный корпус с двумя энергоблоками.

В 1989 г. на Северном Кавказе была создана опытная Ставропольская ГеоТЭС с использованием двухконтурных энергоустановок. В качестве теплоносителя применяется термальна́я вода с температурой 165 °С, добываемой с глубины 4,2 км. Технологическая схема ГеоТЭС была разработана в ЭНИН им.Кржижановского.

Кроме указанных геотермальных теплоэлектростанций разработан проект и выполнено технико-экономическое обоснование Океанской ГеоТЭС на о. Итуруп в Сахалинской области суммарной мощностью 1-й и 2-й очередей 30 МВт. Находится в эксплуатации Курильская ГеоТЭС мощностью 0,5 МВт.

Месторождения парогидротерм имеются в России только на Камчатке и Курилах, поэтому геотермальная энергетика не может играть значительную роль в масштабах страны в целом. Но для указанных районов, энергоснабжение которых целиком зависит от привозного топлива, геотермальная энергетика способна радикально решить проблему энергообеспечения.

### 1.3.3. Малые ГЭС

В свое время в бывшем СССР широкое распространение получили малые ГЭС, которые затем были законсервированы или списаны. Сейчас есть предпосылки возврата к малым ГЭС на новой основе, за счет производства современных гидроагрегатов мощностью от 10 до 5860 кВт. В настоящее время действуют около 50 микроГЭС мощностью от 1,5 до 50 кВт, в том числе каскад ГЭС на р. Толмачева мощностью трех очередей около 45 МВт.

### 1.3.4. Ветроэнергетика

Энергетические ветровые зоны в нашей стране расположены, в основном, на побережье и островах Северного Ледовитого океана от Кольского полуострова до Камчатки, в районах Нижней и Средней Волги и Каспийского моря, на побережье Охотского, Баренцева, Балтийского, Черного и Азовского морей. Отдельные ветровые зоны расположены в Карелии, на Алтае, в Туве, на Байкале. Максимальная средняя скорость ветра в этих районах приходится на осенне-зимний период – период наибольшей потребности в электроэнергии и тепле. Около 30 % экономического потенциала ветроэнергетики сосредоточено на Дальнем Востоке, 14 % – в Северном экономическом районе, около 16 % – в Западной и Восточной Сибири [20].

По оценкам экспертов, валовой ветровой потенциал России составляет  $80 \cdot 10^{15}$  кВт·ч/год, технический ветровой потенциал –  $6,2 \cdot 10^{15}$  кВт·ч/год, экономический ветровой потенциал –  $40 \cdot 10^9$  кВт·ч/год.

Около 70 % территории России, где проживает 10 % населения, находятся в зонах децентрализованного энергоснабжения, которые практически совпадают с зонами потенциально реализуемого ветропотенциала (Камчатка, Магаданская область, Чукотка, Сахалин, Якутия, Бурятия, Таймыр и др.). Это делает целесообразным использование ВЭУ для обеспечения электроэнергией автономных потребителей. Сведения об установленных мощностях основных действующих российских ВЭС приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Установленные мощности действующих российских ВЭС [20]

Название	АО Энерго	Мощность, МВт
Воркутинская ВЭС	АО «Комиэнерго»	1,5
Калмыцкая ВЭС	АО «Калмэнерго»	1,0
Маркинская ВЭС	АО «Ростовэнерго»	0,3

Продолжение таблицы 1.6

Куликовская ВЭС	АО «Янтарьэнерго»	5,1
ВЭС на о. Беринга	АО «Камчатэнерго»	1,2
Башкирская ВЭС		2,2
Анадырская ВЭС	Чукотский АО	2,5
До 1500 малых ВЭУ мощностью 0,1–30 кВт		0,5
Итого		14,3



Недалеко от г. Элиста была построена первая очередь Калмыцкой ВЭС (проектная мощность составляет 23 МВт) на базе ВЭУ «Радуга-1» мощностью 1,0 МВт и с июля 1995 г. подключена к энергосистеме Калмыкии. Установка работает в круглосуточном режиме.

В Ростовской области в составе АО «Ростовэнерго» работает Маркинская ВЭС, известная как ВЭС-300. В ее составе 10 ВЭУ мощностью по 30 кВт каждая. ВЭУ предоставила немецкая компания HSW в рамках проекта «Эльдорадо Винд».

Заполяная ВЭС мощностью 1,5 МВт (г. Воркута) успешно эксплуатируются с 1993 года. Она построена на базе шести установок АВЭ-250 российско-украинского производства мощностью 200–250 кВт каждая.

В настоящее время действует ВЭС на о. Беринга мощностью 1,2 МВт (АО «Камчатэнерго»).

В июле 2002 г. при поддержке датской компании «SEAS Energi Service A.S.» состоялось открытие крупной ВЭС возле поселка Куликово Калининградской области. Куликовская ВЭС ОА «Янтарьэнерго» состоит из 21 ВЭУ датского производства мощностью 225 кВт каждая, суммарная мощность составляет 5,1 МВт. В дальнейшем планируется создание в Калининградской области первой коммерческой ветроэлектрической станции морского базирования мощностью 50 МВт. Ветропарк будет построен в 500 метрах от берега на шельфе Балтийского моря.

Первая на Чукотке ветроэлектростанция (ВЭС-1) была построена на Мысе Обсервации Анадырского района. Установленная мощностью станции 2,5 МВт, она состоит из 10 ветроагрегатов АВЭ-250СМ, номинальная мощность каждого составляет 250 кВт. ВЭС-1 работает достаточно надёжно, без вредных выбросов с более низкой себестоимостью вырабатываемой электроэнергии, чем на дизельных электростанциях. Ежегодная выработка электроэнергии составляет от 2,5 до 3,0 млн кВт·ч, что составляет 50 % потребляемой электроэнергии п. Угольные Копи и аэропорта г. Анадырь расположенных на территории Анадырского района [21].

Подготовлено технико-экономическое обоснование Приморской ветровой электростанции общей мощностью 30 МВт. В качестве основного технологического оборудования приняты комплексные автоматизированные ВЭУ фирмы «Радуга» единичной мощностью 250 и 1000 кВт. ВЭС будет размещается на мысе Лукина, где планируется установить 80 ВЭУ мощностью 250 кВт, и на мысе Поворотном – 10 ВЭУ мощностью 1,0 МВт.

Кроме перечисленных ВЭС в эксплуатации находятся до 1 500 ветроустановок различной мощности (от 0,08 до 30 кВт).

В 2012 г. в селе Головинно на острове Кунашир будет построена энергетическая система (ЛоЭС) на основе ветро-дизельной электростанции. Государственный контракт на строительство подписан с ООО «НГК» (Москва). В настоящее время специалисты компании заняты размещением заказа на изготовление ветро- и дизель-генераторов у хорошо зарекомендовавших себя мировых производителей – компаний Vestas (Дания) и Cummins (США). Проект разработан и финансируется в рамках федеральной целевой программы социально-экономического развития Курил. Первые шаги для его реализации были

сделаны два года назад, когда между селами Головнино и Дубовое протянули новые линии электропередачи. В результате две автономные энергосистемы, каждая со своей дизельной станцией, объединили в единый комплекс. В будущем, когда он дополнится ветроэнергетической установкой, потребители будут обеспечены электрической энергией и в безветренную погоду.

### ***1.3.5. Биоэнергетика***

В России в настоящее время работают несколько комплексов с биогазовыми установками, среди них: в Подмосковье – птицефабрика «Новомосковская», животноводческая ферма «Поярково» агрофирмы «Искра» Солнечногорского района Московской области, Сергачевская птицефабрика в Нижегородской области. В Российской отраслевой программе «Энергосбережение в АПК» на 2001–2006 гг., в разных областях, запланировано строительство 126 биогазовых установок. Кроме этого имеются технические разработки по использованию биогаза в качестве автомобильного топлива.

### ***1.3.6. Солнечная энергетика***

В восьмидесятые годы в Крыму была построена первая экспериментальная солнечная электростанция СЭС-5 мощностью 5 МВт с термодинамическим циклом преобразования энергии, а также экспериментальный комплекс сооружений с солнечным тепло- и хладоснабжением. В 1960–1970-е гг. появились также фотоэлектрические установки автономного электроснабжения. К концу 1980-х гг. в бывшем СССР в эксплуатации находились солнечные установки горячего водоснабжения с общей площадью около 150 тыс. м<sup>2</sup>, а производство солнечных коллекторов доходило до 80 тыс. м<sup>2</sup> в год.

### ***1.3.7. Приливная энергетика***

В 1968 г. в Кислой губе на побережье Баренцева моря появилась экспериментальная Кислогубская ПЭС мощностью 0,4 МВт, на строительстве которой был впервые использован отечественный прогрессивный метод наплавного строительства плотины. На ПЭС был установлен один обратимый капсульный агрегат французской фирмы «Нейрпик». Кислогубская ПЭС является научной базой ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений». В последние годы станция не эксплуатировалась, но в июне 2003 г. руководством Мурманской области и РАО «ЕЭС России» принято совместное решение о ее восстановлении. Гидроагрегаты для восстановления станции и увеличения ее мощности заказаны на предприятии «Звездочка» г. Северодвинск Архангельской области.

В качестве перспектив развития приливной энергетики в России следует отметить проекты Мезенской ПЭС на Белом море (19 200 МВт), Тугурской ПЭС на Охотском море (7 980 МВт). Колоссальные мощности проектируемых ПЭС, обусловленные природными условиями, требуют большое число (по несколько сотен) гидроагрегатов на каждой станции, длительные сроки строи-

тельства, огромные капиталовложения как непосредственно в строительство ПЭС, так и в мероприятия по их адаптации в рамках энергосистемы). Все это делает создание этих ПЭС предметом отдаленного будущего.

#### **1.4. Развитие альтернативной энергетики в мире по итогам 2010 г.**

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), доля производства электроэнергии с использованием ВИЭ (кроме энергии воды) в странах, входящих в Организацию экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), в январе–сентябре 2010 г. по сравнению с аналогичным периодом 2009 г. выросла с 2 % до 3 %, в то время как доля атомной энергетики сократилась с 22 % до 21 %. Доли производства электроэнергии из горючего топлива и на гидростанциях остались прежними – на уровне 62 % и 14 % соответственно.

Странами-лидерами в развитии производства энергии из нетрадиционных источников являются Исландия (около 25 % приходится на долю ВИЭ, в основном используется энергия геотермальных источников), Дания (20,6 %, основной источник – энергия ветра), Португалия (18 %, основные источники – энергия волн, солнца и ветра), Испания (17,7 %, основной источник – солнечная энергия) и Новая Зеландия (15,1 %, в основном используется энергия геотермальных источников и ветра).

Из стран, не входящих в ОЭСР в развитие альтернативной энергетики в 2010 г. инвестировали Ватикан, Китай и Индия. В Ватикане в 2010 г. было завершено строительство самой большой в Европе солнечной электростанции, которая позволит стране практически полностью отказаться от использования других источников энергии. В строительство этого проекта в 2009 г. было вложено около 660 млн долл. Она уже готова и заняла порядка 3 км<sup>2</sup> рядом с Санта Мария ди Галерия, а также на крыше конференц-зала имени Павла Шестого.

Индия также планирует инвестировать в проекты развития солнечной энергетики. Ожидается, что к концу 2011 г. в штате Гуджарат будет построена электростанция, генерирующая 1 000 МВт. Проект оценивается в 1,78 млрд долл.

В то же время Китайское правительство продолжает активно финансировать проекты развития альтернативной энергетики. В 2010 г. Китай встал на второе место в мире после США по объёму произведённой энергии с использованием силы ветра, обогнав Германию. Планируются и новые проекты по строительству ветропарков.

По прогнозам Глобального совета по ветроэнергетике (GWEC) и Гринпис, доля электроэнергии в мире, произведённой с помощью силы ветра, к 2020 г. может достигнуть 12 %. Одним из итогов этого процесса стало подписание 3 декабря 2010 г. меморандума о реализации проекта создания единой оффшорной сети ветряных электрогенераторов на побережье Северного моря общей мощностью 140 ГВт. Меморандум был подписан представителями десяти стран Евросоюза: Дании, Германии, Бельгии, Норвегии, Швеции, Франции, Ирландии, Люксембурга, Нидерландов и Великобритании. Этот проект позволит не только усилить позиции альтернативной энергетики в Европе, но и развить единую электроэнергетическую систему ЕС.

Ещё одной тенденцией развития альтернативной энергетики в мире в 2010 г. можно назвать усиление внимания к возможностям биоэнергетики в связи с тем, что использование таких технологий позволит достичь одновременно двух целей: производство энергии и сокращение объёма CO<sub>2</sub> в атмосфере. Эта тема стала одной из основных во время прошедшего в Канкуне в декабре 2010 г. саммита по проблеме изменения климата. Новые углерод-отрицательные технологии, основанные на производстве энергии из различных видов биомассы, широко обсуждали на саммите и заинтересовали правительства многих государств. Беллона неоднократно писала об этих технологиях и возможностях для их использования.

Для развития международного сотрудничества на уровне ООН в сфере альтернативной энергетики в 2010 г. имело большое значение начало работы созданного в конце 2009 г. специального Международного агентства по возобновляемой энергетике (IRENA). К соглашению о развитии возобновляемой энергетике тогда присоединились 148 стран, хотя на сегодняшний день далеко не все его ратифицировали. Эффективность работы агентства – это показатель серьёзности намерений стран развивать альтернативную энергетику в мире. Вследствие того, что не все страны выполнили свои обязательства по перечислению средств в бюджет агентства, недофинансирование составило 8,4 млн долл. за год. Самыми крупными должниками оказались Япония и США. Причём США пока даже не ратифицировали соглашение в Сенате. Некоторые аналитики считают, что такая ситуация с финансированием могла быть вызвана последствиями экономического кризиса, поэтому в следующих годах такой проблемы не возникнет. Между тем, финансовая проблема – не единственная. В октябре 2010 г. неожиданно сняла с себя полномочия директор IRENA Хелен Пелоссе, хотя изначально планировалось, что она будет занимать этот пост до 2014 г. Таким образом, сейчас ещё рано судить об эффективности работы агентства, оно находится в стадии формирования и организации своей работы. Как и все международные институты, прежде чем будет заметно его влияние на мировое развитие возобновляемой энергетики должно пройти много лет.

## **Вопросы к главе 1**

1. Традиционные и нетрадиционные источники энергии.
2. Политика России в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Запасы и динамика потребления энергоресурсов.
3. Основные объекты нетрадиционной энергетики России.
4. Развитие альтернативной энергетики в мире по итогам 2010 г.
5. Какие виды возобновляемых источников энергии актуальны применительно к условиям России?

## 2. Преобразование солнечной энергии в электрическую

### 2.1. Интенсивность солнечного излучения

Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция на Солнце. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,2 - 3$  мкм. При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется, в основном за счет поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения – озоном и рассеяния излучения молекулами газов и находящимися в воздухе частицами пыли и аэрозолями. Параметром, отражающим влияние атмосферы на интенсивность и спектральный состав солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, является **атмосферная (или воздушная) масса (АМ)**. При нулевой воздушной массе  $AM_0$  у верхней границы атмосферы интенсивность излучения равна  $E_c = 1360$  Вт/м<sup>2</sup>. Величина  $AM_1$  соответствует прохождению солнечного излучения через безоблачную атмосферу до уровня моря при зенитальном расположении Солнца. Воздушная масса для любого уровня земной поверхности в любой момент дня определяется по формуле

$$AM(x) = \frac{x}{x_0} \frac{1}{\sin \theta}, \quad (2.1)$$

где  $x$  – атмосферное давление, Па;

$x_0$  – нормальное атмосферное давление ( $1,013 \cdot 10^5$  Па);

$\theta$  – угол высоты Солнца над горизонтом.

Наиболее характерной в земных условиях является величина  $AM_{1,5}$  ( $\theta = 41^\circ 49'$ ). Она принята за стандартную при интегральной поверхностной плотности солнечного излучения  $E_c = 835$  Вт/м<sup>2</sup>. Это необходимо для обеспечения сравнимости результатов исследований различных солнечных элементов. На рис. 2.1 приведено спектральное распределение потока фотонов внеатмосферного ( $AM_0$ ) и наземного стандартизованного ( $AM_{1,5}$ ) солнечного излучения при перпендикулярном падении лучей на приемную площадку.

Энергия фотонов, эВ, в излучении с длиной волны  $\lambda$  определяется из соотношения

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda}, \quad (2.2)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $6,626196(50) \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

$c$  – скорость света,  $2,9979250(10) \cdot 10^8$  м/с;

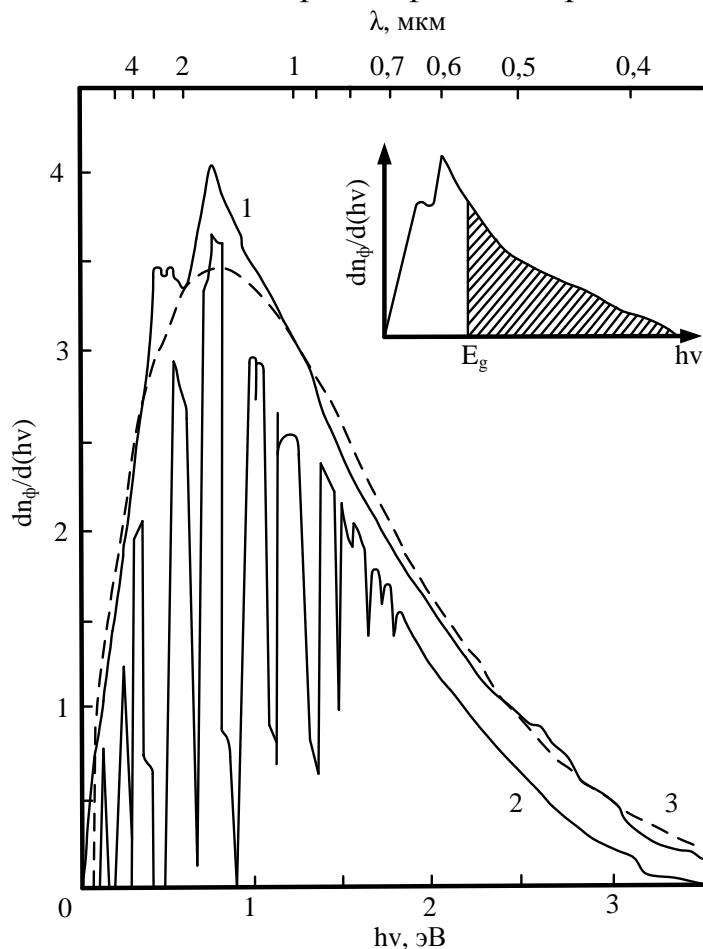
$\lambda$  – длина волны, мкм.

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

Граничная длина волны, мкм, начиная с которой фотоны будут поглощаться в материале солнечного элемента с шириной запрещенной зоны (характеризуется отсутствием энергетических уровней, различна по ширине для разных материалов)  $E_g$

$$\lambda_z = \frac{1,24}{E_g}. \quad (2.3)$$

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



**Рис. 2.1. Спектральное распределение потока фотонов солнечного излучения:**  
 1 – внеатмосферное излучение (AM0); 2 – наземное стандартизованное излучение (AM1,5);  
 3 – спектр излучения абсолютно черного тела при  $T_c = 5800$  К. На вставке заштрихована  
 доля полезно используемых фотонов

## 2.2. Фотоэлектрические свойства *p-n*-перехода

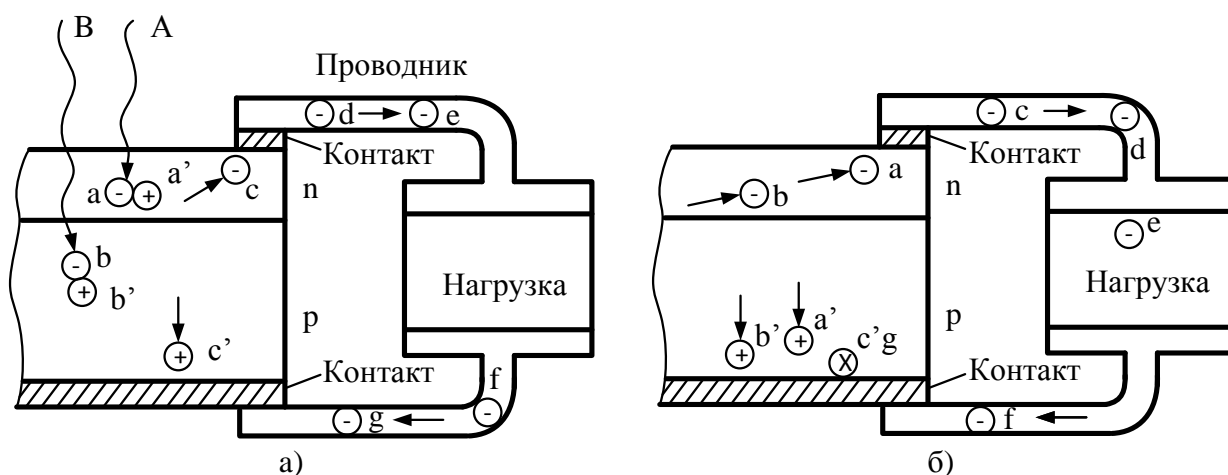
Полупроводники представляют собой класс кристаллических материалов, не относящихся ни к проводникам, ни к изоляторам. При комнатной температуре их удельное сопротивление лежит в диапазоне приблизительно от  $10^{-3}$  до  $10^9$  Ом·см. Практически удельное сопротивление полупроводников, применяемых для изготовления солнечных элементов, лежит в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^2$  Ом·см. Наиболее распространенный в настоящее время полупроводниковый материал солнечных элементов – кремний.

При изготовлении кремния *p*- или *n*-типа в расплав кремния добавляют определенное количество той или иной примеси. Этот процесс называется легированием. Кремний *n*-типа получают, добавляя в расплав кремния элемент V группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева – фосфор, который имеет пять электронов на внешней электронной оболочке, на один больше, чем у

кремния. Примеси V группы называются донорными. Для получения кремния  $p$ -типа в расплав кремния добавляют элементы III группы, например бор. Атом бора имеет три электрона на внешней электронной оболочке, на один электрон меньше, чем атом кремния, который он замещает. Положительный заряд, образовавшийся из-за отсутствия электрона, получил название дырки. Примеси III группы называются акцепторными.

Электроны и дырки могут свободно передвигаться по объему полупроводника. Электрон может занимать место дырки. Этот процесс называется рекомбинацией. Однако на месте прежнего пребывания электрона возникает новая дырка. Под действием электрического поля электроны движутся в одном направлении, а дырки – в противоположном.

Полупроводниковые приборы изготавливаются из исходных базовых пластин  $p$ - или  $n$ -типа.  $P$ - $n$ -переходом называют поверхность раздела между слоями, имеющими проводимость противоположного знака. Рассмотрим полупроводниковый кристалл, содержащий  $p$ - $n$ -переход (рис. 2.2).



**Рис. 2.2. Генерирование электрического тока солнечным элементом (элемент дан в разрезе):**

- а – образование электронно-дырочных пар  $aa'$  и  $bb'$  под действием фотонов А и В;
- б – движение неосновных носителей заряда дырки  $a'$  и электрона  $b$  и рекомбинация электрона  $g$  с дыркой  $c'$

При соединении в одном монокристалле полупроводников  $p$ - и  $n$ -типа возникает диффузионный поток электронов из полупроводника  $n$ -типа в полупроводник  $p$ -типа и, наоборот, поток дырок из  $p$ - в  $n$ -полупроводник. В результате такого процесса прилегающая к  $p$ - $n$ -переходу часть полупроводника  $p$ -типа будет заряжаться отрицательно, а прилегающая к  $p$ - $n$ -переходу часть полупроводника  $n$ -типа, наоборот, приобретет положительный заряд. Изменение проводимости материалов происходит в области перехода толщиной менее 1 мкм. Таким образом, вблизи  $p$ - $n$ -перехода образуется двойной заряженный слой, который противодействует процессу диффузии электронов и дырок. Действительно, диффузия стремится создать поток электронов из  $n$ -области в  $p$ -область, а поле заряженного слоя, наоборот, – вернуть электроны в  $n$ -область. Аналогичным образом поле в  $p$ - $n$ -переходе противодействует диффузии дырок из  $p$ - в  $n$ -область. В результате устанавливается равновесное состояние: в области  $p$ - $n$ -перехода возникает потенциальный барьер, для преодоления которого электроны из  $n$ -полупроводника и

дырки из  $p$ -полупроводника должны затратить определенную энергию.

Переход является идеализированным электрическим понятием, не отражающим все особенности реального физического перехода от материала  $p$ -типа к материалу  $n$ -типа. Лишь какая-то часть реального перехода подчиняется теоретическим закономерностям, выведенным для идеального  $p$ - $n$ -перехода.

Пусть солнечный элемент освещается солнечным светом. Фотоны с различной энергией будут поглощаться в полупроводниковом материале на различной глубине (рис. 2.2, а). На рисунке показана также внешняя нагрузка (сопротивление), присоединенная к контактам элемента. Фотоны  $A$  и  $B$  выбили электроны  $a$  и  $b$  из соответствующих атомов полупроводника. Фотон  $A$  имеет большую энергию (меньшую длину волны), чем фотон  $B$ . На месте выбитых электронов образовались две электрические вакансии – дырки  $a'$  и  $b'$ . Т. е. фотоны образовали электронно-дырочные пары  $aa'$  и  $bb'$ . Теперь неосновные носители заряда (дырки в  $n$ -полупроводнике и электроны в  $p$ -полупроводнике) могут двигаться по материалу полупроводника под действием электрических полей, образовавшихся в материале под влиянием  $p$ - $n$ -перехода. Электроны притягиваются  $n$ -областью, где они становятся основными носителями, а дырки –  $p$ -областью. В результате полупроводник  $p$ -типа получает избыточный положительный заряд, а полупроводник  $n$ -типа – отрицательный. Между  $n$ - и  $p$ -областями фотоэлемента возникает разность потенциалов – фотоЭДС, или напряжение в режиме холостого хода. Полярность фотоЭДС соответствует «прямому» смещению  $p$ - $n$ -перехода, которое понижает высоту потенциального барьера и способствует инжекции дырок из  $p$ -области в  $n$ -область и электронов из  $n$ -области в  $p$ -область. В результате действия этих двух противоположных механизмов – накопления носителей тока под действием света и их оттока из-за понижения высоты потенциального барьера – при разной интенсивности света устанавливается разная величина фотоЭДС. При этом величина фотоЭДС в широком диапазоне освещенностей растет пропорционально логарифму интенсивности света.

При коротком замыкании освещенного  $p$ - $n$ -перехода в электрической цепи потечет ток, пропорциональный по величине интенсивности освещения и количеству генерированных светом электронно-дырочных пар. При включении в электрическую цепь полезной нагрузки, величина тока в цепи несколько уменьшится. Пройдя через внешнюю нагрузку из  $n$ -области в  $p$ -область электроны занимают место дырок, т. е. рекомбинируют. При этом они становятся электрически нейтральными до тех пор, пока новый фотон снова не разделит их на электронно-дырочную пару. Обычно электрическое сопротивление полезной нагрузки в цепи солнечного элемента выбирают таким, чтобы получить максимальную отдаваемую этой нагрузке электрическую мощность.

### 2.3. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

Поток генерированных светом носителей образует фототок  $I_\phi$ . Величина  $I_\phi$  равна числу фотогенерированных носителей, прошедших через  $p$ - $n$ -переход в единицу времени



$$I_{\phi} = q \frac{P_u}{h\nu}, \quad (2.4)$$

где  $q$  – величина заряда электрона;

$P_u$  – мощность поглощенного монохроматического излучения.

Здесь предполагается, что в полупроводнике каждый поглощенный фотон с энергией  $h\nu \geq E_g$  создает одну электронно-дырочную пару. Это условие хорошо выполняется для солнечных элементов на основе Si и GaAs (в кремнии внутренний фотоэффект имеет место для волн с длиной  $\lambda \leq 1,1$  мкм, т.е. для видимого, ультрафиолетового и ближнего инфракрасного излучений).

В режиме холостого хода фототок уравнивается «темновым» током  $I_d$  – прямым током через  $p$ - $n$ -переход, возникающим при напряжении смещения  $U = U_{xx}$ . При этом через  $p$ - $n$ -переход протекают следующие токи: неосновных носителей, основных носителей и первичный фототок. Абсолютное значение «темнового» тока

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (2.5)$$

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

$T$  – абсолютная температура, К;

$I_0$  – ток насыщения (представляет сумму токов неосновных носителей);

Плотность тока насыщения определяется уравнением

$$I_0 = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}, \quad (2.6)$$

где  $p_{n0}$  и  $n_{p0}$  – концентрации неосновных носителей заряда, соответственно дырок в  $n$ -области и электронов в  $p$ -области;

$D_p$  и  $D_n$  – коэффициенты диффузии соответственно дырок и электронов (зависят от свойств материала);

$L_p$  и  $L_n$  – диффузионная длина, т. е. расстояние, проходимое неосновным носителем заряда за время жизни  $\tau_p$  и  $\tau_n$  соответственно.

Временем жизни  $\tau$  неосновного носителя заряда называется период времени с момента инжекции носителя в ту область материала, где он является неосновным, до момента его рекомбинации с основным носителем заряда.

Диффузионная длина определяется по формулам

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}; \quad (2.7)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}. \quad (2.8)$$

Полный ток через  $p$ - $n$ -переход равен

$$I = I_{\phi} - I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right). \quad (2.9)$$

Эта формула описывает вольт-амперную характеристику освещенного  $p$ - $n$ -перехода. На основании этого теоретического уравнения можно построить

эквивалентную идеализированную электрическую схему (рис. 2.3). Источник тока создает ток фотонов  $I_\phi$ , зависящий от уровня инжекции (плотности потока излучения); в свою очередь вольт-амперная характеристика элемента (зависимость плотности тока от напряжения) определяется величиной  $I_\phi$  и плотностью тока  $I_d$ , протекающего через идеализированный  $p$ - $n$ -переход при определенной абсолютной температуре  $T$  и напряжении на выходе  $U$ .

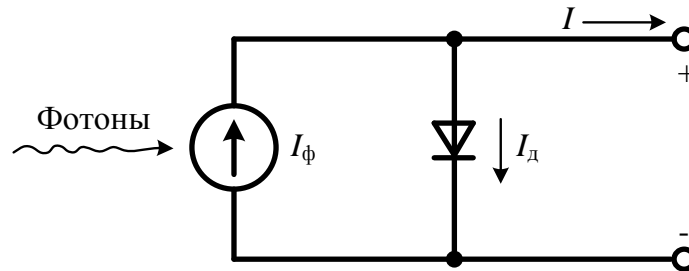


Рис. 2.3. Идеализированная модель солнечного элемента

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

$$I_{к.з} = I_\phi. \quad (2.10)$$

Напряжение смещения

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_\phi + I}{I_0} + 1 \right), \quad (2.11)$$

откуда напряжение холостого хода

$$U_{х.х} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_\phi}{I_0} + 1 \right). \quad (2.12)$$

Рассмотрим подключение к  $p$ - $n$ -переходу варьированного сопротивления нагрузки. Направление тока в нагрузке всегда совпадает с направлением  $I_\phi$ , а сам ток нагрузки  $I_n$  равен результирующему току через  $p$ - $n$ -переход (2.9). Принимая направление тока  $I_\phi$  за положительное, для  $I_n$  можно записать

$$I_n = I_\phi - I_0 \left( e^{\frac{qU_n}{kT}} - 1 \right), \quad (2.13)$$

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

Выражение (2.13) описывает нагрузочную вольт-амперную характеристику освещенного  $p$ - $n$ -перехода. В соответствии с данным выражением освещенный  $p$ - $n$ -переход может быть представлен в виде эквивалентной схемы (рис. 2.4, а). Здесь источник тока имитирует генерацию постоянного фототока, не зависящего от напряжения  $p$ - $n$ -перехода, а диод представляет собой неосвещенный  $p$ - $n$ -переход. Нагрузочная вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода изображена на рис. 2.4, б. При варьировании  $R_n$  фототок перераспределяется между нагрузкой и  $p$ - $n$ -переходом.

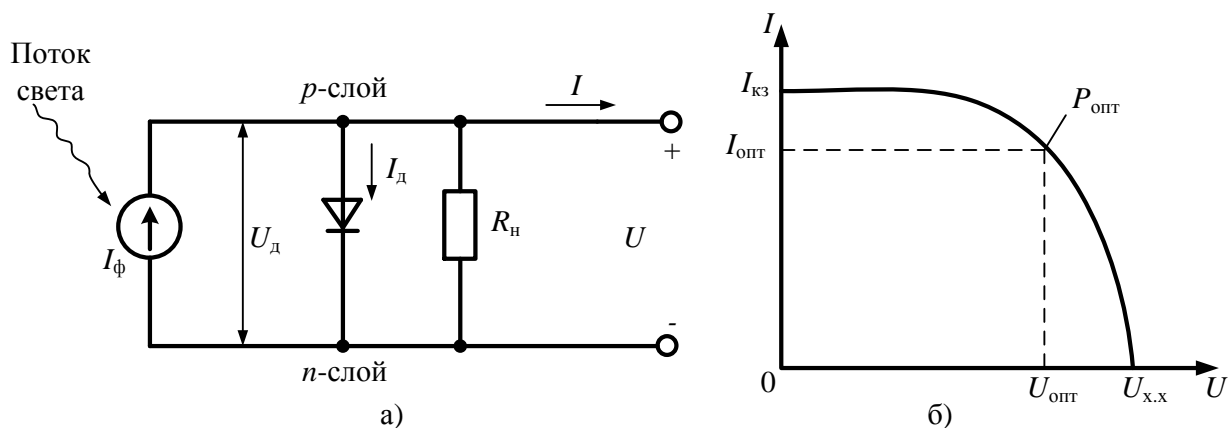


Рис. 2.4. Эквивалентная схема освещенного *p-n*-перехода с сопротивлением нагрузки (а) и нагрузочная вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода

Электрическая мощность, выделяемая в нагрузке, определяется по формуле (пренебрегаем единицей в формуле (2.13))

$$P = I_n U_n = U_n \left( I_\phi - I_0 e^{\frac{qU_n}{AkT}} \right). \quad (2.14)$$

где  $A$  – коэффициент, полученный при сравнении теоретической и экспериментальной кривых вольт-амперной характеристики, принимает значения от 1 до 5.

В режимах короткого замыкания и холостого хода  $P = 0$ , поскольку либо  $U_n$ , либо  $I_n$  равны нулю.

## 2.4. Конструкции и материалы солнечных элементов

Производство структур на основе монокристаллического кремния – процесс технологически сложный и дорогостоящий. Поэтому внимание было обращено на такие материалы, как сплавы на основе аморфного кремния (a-Si:H), арсенид галлия и поликристаллические полупроводники.

**Аморфный кремний** выступил в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому. Первые солнечные элементы на его основе были созданы в 1975 г. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического. Поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки a-Si:H толщиной 0,5–1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых 300.

мкм подложек. Кроме того, благодаря существующим технологиям получения тонких пленок аморфного кремния большой площади не требуется операции резки, шлифовки и полировки, необходимых для солнечных элементов на основе монокристаллического кремния. По сравнению с поликристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе a-Si:H производят при более низких температурах (300 °С): можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сократит расход кремния в 20 раз.

Пока максимальный к. п. д. экспериментальных элементов на основе a-Si:H – 12 % – несколько ниже к. п. д. кристаллических кремниевых солнечных

элементов (~15 %). Однако не исключено, что с развитием технологии к. п. д. элементов на основе a-Si:H достигнет теоретического потолка – 16 %.

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

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

Главное достоинство арсенида галлия и сплавов на его основе – широкий диапазон возможностей для дизайна солнечных элементов. Фотоэлемент на основе GaAs может состоять из нескольких слоев различного состава. Это позволяет разработчику с большой точностью управлять генерацией носителей заряда, что в кремниевых солнечных элементах ограничено допустимым уровнем легирования. Типичный солнечный элемент на основе GaAs состоит из очень тонкого слоя AlGaAs в качестве окна.

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

**Поликристаллические тонкие пленки** также весьма перспективны для солнечной энергетики. Чрезвычайно высока способность к поглощению солнечного излучения у диселенида меди и индия ( $\text{CuInSe}_2$ ) – 99 % света поглощается в первом микроне этого материала (ширина запрещенной зоны – 1,0 эВ) [2, 5]. Наиболее распространенным материалом для изготовления окна солнечной батареи на основе  $\text{CuInSe}_2$  является CdS. Иногда для улучшения прозрачности окна в сульфид кадмия добавляют цинк. Немного галлия в слое  $\text{CuInSe}_2$  увеличивает ширину запрещенной зоны, что приводит к росту напряжения холостого хода и, следовательно, повышению эффективности устройства. Один из основных способов получения  $\text{CuInSe}_2$  – электрохимическое осаждение из растворов  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{SeO}_2$  в деионизованной воде при соотношении компонентов Cu:In:Se как 1:5:3 и  $\text{pH} > 1,2$ –2,0.

Новые фотоэлектрические ячейки состоят из меди, цинка и олова  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) и способны преобразовывать лучи света в электрическую энергию с к. п. д. в 11,1 процента. Этот показатель не может сравниться с результатами солнечных батарей из кремния, но разработка IBM более чем на 10 % эффективнее, чем все остальные продукты в данном классе. В Университете штата Орегон (США) разработан новый способ использования технологии микроволнового нагрева для производства фотоэлементов на базе CZTS. Тех-

нологам удалось получать тонкоплёночные солнечные батареи при помощи смешивания наночастиц финального вещества в виде чернил, с последующим их нанесением по принтерной технологии.

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

Подобно CuInSe<sub>2</sub>, наилучшие элементы на основе CdTe включают гетеропереход с CdS в качестве оконного слоя. Оксид олова используется как прозрачный контакт и просветляющее покрытие. Серьезная проблема на пути применения CdTe – высокое сопротивление слоя *p*-CdTe, что приводит к большим внутренним потерям. Но она решена в *p-i-n*-структуре с гетеропереходом CdTe/ZnTe. Пленки CdTe обладают высокой подвижностью носителей заряда, а солнечные элементы на их основе – высокими значениями к. п. д., от 10 до 16%.

Среди солнечных элементов особое место занимают батареи, использующие **органические материалы**. Коэффициент полезного действия солнечных элементов на основе диоксида титана, покрытого органическим красителем, весьма высок – ~11 %. Основа солнечных элементов данного типа – широкозонный полупроводник, обычно TiO<sub>2</sub>, покрытый монослоем органического красителя. Принцип работы элемента основан на фотовозбуждении красителя и быстрой инжекции электрона в зону проводимости TiO<sub>2</sub>. При этом молекула красителя окисляется, через элемент идет электрический ток и на платиновом электроде происходит восстановление трииодида до иодида. Затем иодид проходит через электролит к фотоэлектроду, где восстанавливает окисленный краситель.

## Вопросы к главе 2

1. Интенсивность солнечного излучения.
2. Фотоэлектрические свойства *p-n*-перехода.
3. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента.
4. Конструкции солнечных элементов.
5. Материалы солнечных элементов.

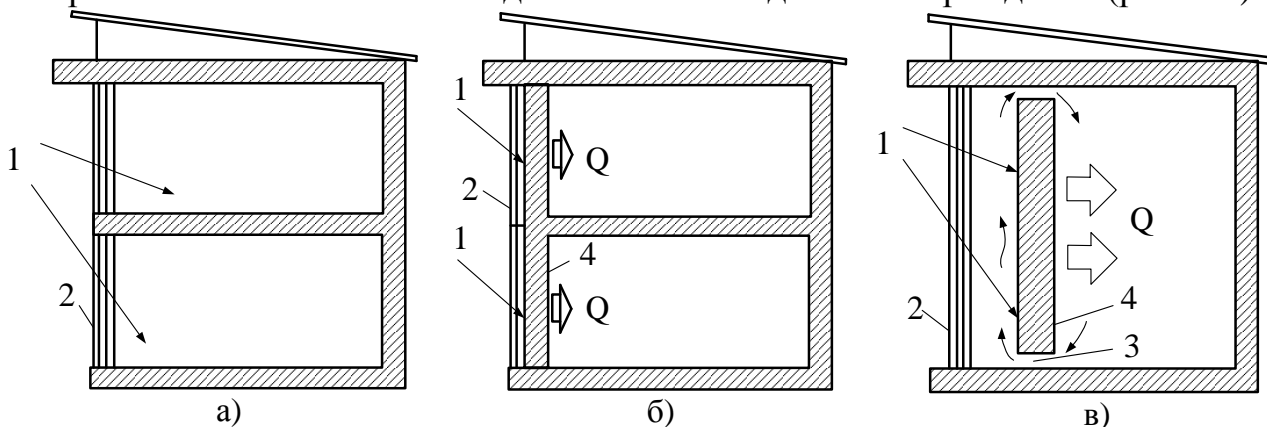
### 3. Системы солнечного теплоснабжения

#### 3.1. Классификация и основные элементы гелиосистем

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

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

**Пассивными** называются системы солнечного отопления, в которых гелиоприемником является само здание или его отдельные ограждения (рис. 3.1).



**Рис. 3.1. Пассивные низкотемпературные системы солнечного отопления:**

а – открытая; б – закрытая; в – закрытая Тромба-Мишеля; 1 – солнечные лучи; 2 – остекление; 3 – циркуляционные каналы; 4 – стена здания

Пассивные системы условно могут быть подразделены на:

- а) открытые (солнечные лучи проникают в отапливаемые помещения через оконные проемы, обычно увеличенных размеров, и нагревают строительные конструкции, которые становятся приемниками и аккумуляторами тепла (рис. 3.1, а);
- б) закрытые (поток солнечной радиации непосредственно в помещение не проникает, а поглощается приемниками солнечной радиации, совмещенными с наружными ограждающими конструкциями, которые являются и аккумуляторами теплоты (рис. 3.1, б).

Подобные системы имеют ряд существенных недостатков:

- а) неустойчивость теплового режима;
- б) обязательное использование вспомогательной нагревательной системы;
- в) неравномерный прогрев внутреннего воздуха в помещении;
- г) отсутствие возможности осуществить передачу теплого воздуха в другие помещения.

Более эффективными являются системы Ф. Тромба и Дж. Мишеля с циркуляцией теплоносителя через пассивный гелиоприемник (рис. 3.1, в). По сравнению с системами без циркуляции такие системы имеют существенные преимущества:

- а) внутренний воздух прогревается более равномерно и нагрев его начинается уже в ранние утренние часы;
- б) представляется возможным обеспечить циркуляцию внутреннего воздуха в помещениях, непосредственно не примыкающих к гелиоприемнику.

**Активными** называются системы солнечного низкотемпературного отопления, в которых гелиоприемник является самостоятельным отдельным устройством, не относящимся к зданию. Активные гелиосистемы могут быть подразделены:

- а) по назначению (системы горячего водоснабжения, отопления, комбинированные системы для целей теплоснабжения);
- б) по виду используемого теплоносителя (жидкостные – вода, антифриз и воздушные);
- в) по продолжительности работы (круглогодичные, сезонные);
- г) по техническому решению схем (одно-, двух-, многоконтурные).

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

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

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

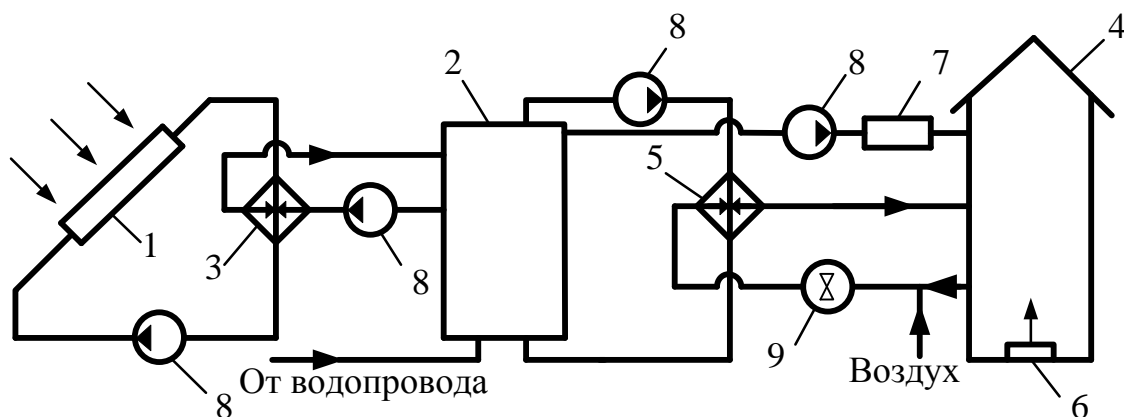
Гелиосистемы отопления зданий обычно двухконтурные или чаще всего многоконтурные, причем для разных контуров могут быть применены различные теплоносители (например, в гелиоконтуре – водные растворы незамерзающих жидкостей, в промежуточных контурах – вода, а в контуре потребителя – воздух).

Комбинированные гелиосистемы круглогодичного действия для целей теплоснабжения зданий многоконтурные и включают дополнительный источник теплоты в виде традиционного теплогенератора, работающего на органическом топливе, или трансформатора теплоты.

Принципиальная схема системы солнечного теплоснабжения приведена на рис. 3.2. Она включает три контура циркуляции:

- а) первый контур, состоящий из солнечных коллекторов 1, циркуляционного насоса 8 и жидкостного теплообменника 3;
- б) второй контур, состоящий из бака-аккумулятора 2, циркуляционного насоса 8 и теплообменника 3;

- в) третий контур, состоящий из бака-аккумулятора 2, циркуляционного насоса 8, водовоздушного теплообменника (калорифера) 5.



**Рис. 3.2. Принципиальная схема системы солнечного теплоснабжения:**

1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – теплообменник; 4 – здание;  
5 – калорифер; 6 – дублер системы отопления; 7 – дублер системы горячего водоснабжения;  
8 – циркуляционный насос; 9 – вентилятор

Функционирует система солнечного теплоснабжения следующим образом. Теплоноситель (антифриз) теплоприемного контура, нагреваясь в солнечных коллекторах 1, поступает в теплообменник 3, где теплота антифриза передается воде, циркулирующей в межтрубном пространстве теплообменника 3 под действием насоса 8 второго контура. Нагретая вода поступает в бак-аккумулятор 2.

Из бака-аккумулятора вода забирается насосом горячего водоснабжения 8, доводится при необходимости до требуемой температуры в дублере 7 и поступает в систему горячего водоснабжения здания. Подпитка бака-аккумулятора осуществляется из водопровода.

Для отопления вода из бака-аккумулятора 2 подается насосом третьего контура 8 в калорифер 5, через который с помощью вентилятора 9 пропускается воздух и, нагревшись, поступает в здание 3. В случае отсутствия солнечной радиации или нехватки тепловой энергии, вырабатываемой солнечными коллекторами, в работу включается дублер 6.

Выбор и компоновка элементов системы солнечного теплоснабжения в каждом конкретном случае определяются климатическими факторами, назначением объекта, режимом теплоснабжения, экономическими показателями.

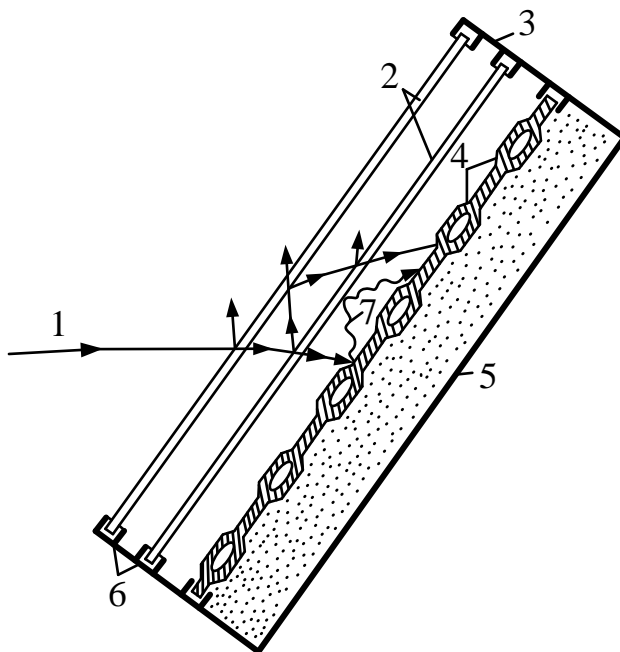
### 3.2. Плоские солнечные коллекторы

**Плоский солнечный коллектор** – устройство с поглощающей панелью плоской конфигурации и плоской прозрачной изоляцией для поглощения энергии солнечного излучения и преобразования ее в тепловую.

Плоские солнечные коллекторы (рис. 3.3) состоят из стеклянного или пластикового покрытия (одинарного, двойного, тройного), тепловоспринимающей панели, окрашенной со стороны, обращенной к солнцу, в черный цвет,



изоляции на обратной стороне и корпуса (металлического, пластикового, стеклянного, деревянного).



**Рис. 3.3. Плоский солнечный коллектор:**

1 – солнечные лучи; 2 – остекление; 3 – корпус; 4 – теплопринимающая поверхность; 5 – теплоизоляция; 6 – уплотнитель; 7 – собственное длинноволновое излучение теплопринимающей пластины

В качестве теплопринимающей панели можно использовать любой металлический или пластмассовый лист с каналами для теплоносителя. Изготавливаются теплопринимающие панели из алюминия или стали двух типов: лист-труба и штампованные панели (труба в листе). Пластмассовые панели из-за недолговечности и быстрого старения под действием солнечных лучей, а также из-за малой теплопроводности не находят широкого применения.

Рассмотрим уравнение баланса энергии плоского солнечного коллектора для стационарных условий, которое определяет теплопроизводительность коллектора в расчете на единицу площади теплопринимающей поверхности как разность поглощенного солнечного излучения и тепловых потерь в окружающую среду

$$q_k = f' \eta_o q - f k_k (\bar{t}_k - t_{\text{нр}}), \quad (3.1)$$

где  $q$  – поверхностная плотность потока суммарной (прямой, отраженной и диффузной) солнечной радиации в плоскости коллектора;

$f'$  – коэффициент эффективности;

$\eta_o$  – оптический КПД, практически равный произведению пропускательной способности прозрачной изоляции  $\tau$  на поглощательную способность поглощающей панели  $\alpha$  в солнечном спектре;

$k_k$  – общий коэффициент теплопередачи от коллектора в окружающую среду;

$\bar{t}_k$  – средняя температура теплоносителя в коллекторе;

$t_{\text{нр}}$  – температура наружного воздуха.

Коэффициент эффективности  $f'$  характеризует степень неравномерности температурного поля в поперечном сечении панели, т. е. эффективность переноса поглощенного солнечного излучения к потоку теплоносителя в трубах. Он зависит главным образом от конструкции панели. Максимальное его значение, равное 1, достигается в том случае, когда теплопроводность материала листовой части панели  $\lambda \rightarrow \infty$ , термическое сопротивление контакта между листом и трубой  $R_k \rightarrow 0$  и коэффициент теплопередачи от стенки трубы к теплоносителю  $k \rightarrow \infty$ . При проектировании коллектора для обеспечения его максимальной теплопроводности необходимо в соответствии с уравнением (3.1) реализовать по возможности большие значения  $f'$  и  $\eta_0$  и свести к минимуму тепловые потери.

Одной из характеристик коллектора является максимальная температура  $t_\infty$ , до которой нагревается поглощающая панель, если от коллектора не отводится теплота. При этом все поглощенное солнечное излучение переходит в тепловые потери. Если в уравнении (3.1) принять  $q_k = 0$  и  $\bar{t}_k = t_\infty$ , то

$$t_\infty = t_{\text{нр}} + \frac{\eta_0 q}{k_k}. \quad (3.2)$$

Согласно (3.2) при  $q = 750 \text{ Вт/м}^2$ ,  $t_{\text{нр}} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\eta_0 = 0,8$  и  $k_k = 7,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$  (коллектор с одинарным остеклением и панелью, окрашенной обычной черной краской) значение  $t_\infty$  составляет  $100^\circ\text{C}$ .

Важной характеристикой коллектора является его к. п. д., который определяется как отношение теплопроизводительности к падающему потоку солнечной радиации. Согласно (3.1)

$$\eta = f' \eta_0 - \frac{f k_k (\bar{t}_k - t_{\text{нр}})}{q}. \quad (3.3)$$

Зависимость  $\eta = f(\bar{t}_k - t_{\text{нр}}/q)$  графически представляет собой прямую линию, которую рассматривают как тепловую характеристику коллектора. При этом  $f' \eta_0$  – отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат, а  $f k_k$  – угловой коэффициент прямой. В соответствии с уравнением (3.3) к. п. д. изменяется от максимального значения  $f' \eta_0$  при  $\bar{t}_k = t_0$  до нуля при  $\bar{t}_k = t_\infty$ . Часто для сравнения коллекторов между собой применяют величины  $f_R \eta_0$  и  $f_R k_k$ , где  $f_R$  – коэффициент отвода теплоты из коллектора, который связан с  $f'$  выражением

$$f_R = \frac{g_k c_p}{k_k} \left( 1 - e^{-\frac{f k_k}{g_k c_p}} \right), \quad (3.4)$$

где  $g_k$  – удельный (на единицу площади тепловоспринимающей поверхности коллектора) расход теплоносителя через коллектор;  
 $c_p$  – удельная теплоемкость теплоносителя.

Если в уравнении (3.1) заменить среднюю температуру теплоносителя  $\bar{t}_k$  на его температуру на входе в коллектор  $t_{\text{вх}}$ , то  $f'$  в этом уравнении следует

заменить на  $f_R$

$$q_k = f_R \eta_o q - f_R k_k (t_{\text{вх}} - t_{\text{нр}}). \quad (3.5)$$

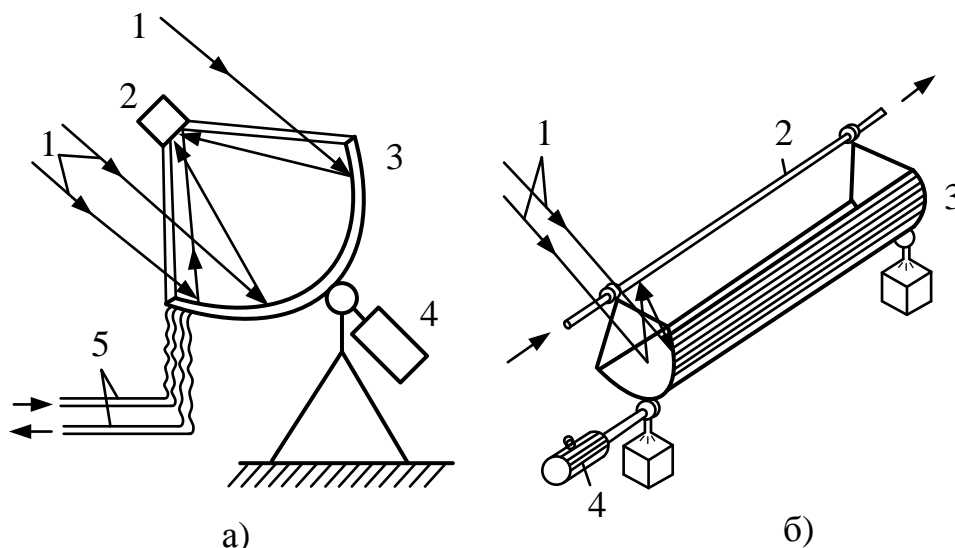
Для повышения эффективности коллектора и достижения более высоких температур теплоносителя поверхность пластины покрывают спектрально-селективными слоями, активно поглощающими коротковолновое излучение солнца и снижающими ее собственное тепловое излучение в длинноволновой части спектра. Такие конструкции на основе «черного никеля», «черного хрома», окиси меди на алюминии, окиси меди на меди и другие дорогостоящи (их стоимость часто соизмерима со стоимостью самой тепловоспринимающей панели). Другим способом улучшения характеристик плоских коллекторов является создание вакуума между тепловоспринимающей панелью и прозрачной изоляцией для уменьшения тепловых потерь (солнечные коллекторы четвертого поколения).

Опыт эксплуатации солнечных установок на основе солнечных коллекторов выявил ряд существенных недостатков подобных систем. Прежде всего это высокая стоимость коллекторов. Увеличение эффективности их работы за счет селективных покрытий, повышение прозрачности остекления, вакуумирования, а также устройства системы охлаждения оказываются экономически нерентабельными. Существенным недостатком является необходимость частой очистки стекол от пыли, что практически исключает применение коллектора в промышленных районах. При длительной эксплуатации солнечных коллекторов, особенно в зимних условиях, наблюдается частый выход их из строя из-за неравномерности расширения освещенных и затемненных участков стекла за счет нарушения целостности остекления. Отмечается также большой процент выхода из строя коллекторов при транспортировке и монтаже. Значительным недостатком работы систем с коллекторами является также неравномерность загрузки в течение года и суток. Опыт эксплуатации коллекторов в условиях Европы и европейской части России при высокой доле диффузной радиации (до 50 %) показал невозможность создания круглогодичной автономной системы горячего водоснабжения и отопления. Все гелиосистемы с солнечными коллекторами в средних широтах требуют устройства больших по объему баков-аккумуляторов и включения в систему дополнительного источника энергии, что снижает экономический эффект от их применения. В связи с этим наиболее целесообразно их использование в районах с высокой средней интенсивностью солнечной радиации (не ниже 300 Вт/м<sup>2</sup>).

### 3.3. Концентрирующие гелиоприемники

**Концентрирующие гелиоприемники** представляют собой сферические или параболические зеркала (рис. 3.1), выполненные из полированного металла, в фокус которых помещают тепловоспринимающий элемент (солнечный котел), через который циркулирует теплоноситель. В качестве теплоносителя используют воду или незамерзающие жидкости. При использовании в качестве теплоносителя воды в ночные часы и в холодный период систему обязательно опорожняют для предотвращения ее замерзания.

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.



**Рис. 3.4. Концентрирующие гелиоприемники:**

- а – параболический концентратор; б – параболоцилиндрический концентратор;  
 1 – солнечные лучи; 2 – тепловоспринимающий элемент (солнечный коллектор);  
 3 – зеркало; 4 – механизм привода системы слежения; 5 – трубопроводы, подводящие  
 и отводящие теплоноситель

Преимуществом систем с концентрирующими гелиоприемниками является способность выработки теплоты с относительно высокой температурой (до 100 °С) и даже пара. К недостаткам следует отнести высокую стоимость конструкции; необходимость постоянной очистки отражающих поверхностей от пыли; работу только в светлое время суток, а следовательно, потребность в аккумуляторах большого объема; большие энергозатраты на привод системы слежения за ходом Солнца, соизмеримые с вырабатываемой энергией. Эти недостатки сдерживают широкое применение активных низкотемпературных систем солнечного отопления с концентрирующими гелиоприемниками.

### Вопросы к главе 3

1. Классификация и основные элементы гелиосистем.
2. Системы солнечного теплоснабжения, принцип действия, достоинства и недостатки
3. Плоские солнечные коллекторы.
4. Концентрирующие гелиоприемники.

## 4. Тепловое аккумулирование энергии

### 4.1. Энергетический баланс теплового аккумулятора

**Тепловое аккумулирование** – это физические или химические процессы, посредством которых происходит накопление тепла в тепловом аккумуляторе энергии (ТАЭ).

**Аккумулятор** состоит из резервуара для хранения (обычно теплоизолированного), аккумулирующей среды (рабочего тела), устройств для зарядки и разрядки и вспомогательного оборудования.

**Аккумулирующая система** характеризуется способами, которыми энергия для зарядки аккумулятора отбирается от источника, трансформируется (при необходимости) в требуемый вид энергии и отдается потребителю.

На рис. 4.1 показан процесс теплового аккумулирования с использованием сосуда-аккумулятора. Баланс энергии для этого процесса в общем виде можно записать

$$E_{\text{вх}} - E_{\text{вых}} = E_{\text{ак}}, \quad (4.1)$$

где  $E_{\text{вх}}$  – подведенная энергия,  $E_{\text{вых}}$  – отведенная энергия,  $E_{\text{ак}}$  – аккумулированная энергия.

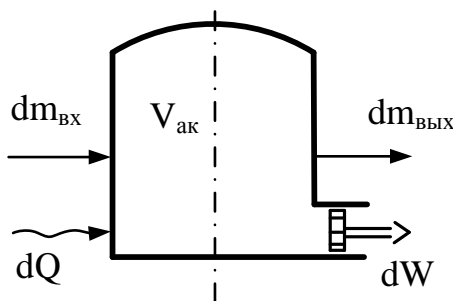


Рис. 4.1. Энергетический баланс аккумулятора

Применяя первый закон термодинамики для подведенной и отведенной энергии к этой открытой системе, получим основное уравнение аккумулирования энергии для открытых систем в дифференциальной форме:

$$\left( u + pv + gH + \frac{c^2}{2} \right)_{\text{вх}} dm_{\text{вх}} + dQ - \left( u + pv + gH + \frac{c^2}{2} \right)_{\text{вых}} dm_{\text{вых}} - dW = d \left[ \left( u + gH + \frac{c^2}{2} \right)_{\text{ак}} m_{\text{ак}} \right], \quad (4.2)$$

где  $m_{\text{ак}}$  – масса аккумулирующей среды;  $u$  – внутренняя энергия (отсчитываемая от произвольного нулевого уровня);  $p$  – давление;  $v$  – удельный объем;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $H$  – высота (отсчитываемая от произвольного нулевого уровня);  $gH$  – удельная потенциальная энергия;  $c$  – скорость течения;  $c^2/2$  – удельная кинетическая энергия;  $dQ$  – тепло, подведенное к системе;  $dW$  – работа системы, не зависящая от переноса массы (например, при движении стенок системы, электрическая энергия, энергия вала двигателя).

Исследование общего уравнения (4.2) показывает, что аккумулярование энергии может осуществляться в результате изменения: а) удельной внутренней энергии; б) удельной потенциальной энергии; в) удельной кинетической энергии; г) массы системы. К тепловому аккумулярованию энергии обычно относят случай (а), а также случай (б), если удельная внутренняя энергия рабочего тела выше, чем окружающей среды.

Если накопление и кинетической, и потенциальной энергии исключено ( $c_{ак} = 0$ ,  $H_{ак} = 0$ ) и если, кроме того, члены уравнения (4.2), соответствующие кинетической и потенциальной энергиям подводимой и отводимой масс, пренебрежимо малы, а работа ограничена движением поверхностей, ограничивающих систему, т. е. если

$$dW = p_{ак} dV_{ак}, \quad (4.3)$$

где  $V_{ак}$  – объем аккумулятора;  $p_{ак}$  – давление в аккумуляторе, то уравнение (4.2) преобразуется к виду, справедливому для аккумулятора тепла

$$(u + pv)_{вх} dm_{вх} + dQ - (u + pv)_{вых} dm_{вых} = d(um)_{ак} + p_{ак} dV_{ак}. \quad (4.4)$$

Используя определение энтальпии, имеем

$$h = u + pv, \quad (4.5)$$

и, следовательно, энергетический баланс (4.1) принимает вид

$$h_{вх} dm_{вх} + dQ - h_{вых} dm_{вых} = d(um)_{ак} + p_{ак} dV_{ак}. \quad (4.6)$$

Соответственно баланс массы запишется как

$$dm_{вх} - dm_{вых} = dm_{ак}. \quad (4.7)$$

Процессы зарядки и разрядки описываются в общем виде уравнениями (4.4) или (4.6) и (4.7). В простых случаях возможно аналитическое решение. В других, более сложных случаях могут быть получены численные решения (в особенности это относится к процессу разрядки).

## 4.2. Классификация аккумуляторов тепла

В соответствии с принятыми выше определениями и выводами можно провести классификацию аккумуляторов тепла.

### 1. Аккумулирующая и теплообменная среды.

а. Прямое аккумулярование: аккумулярующей и теплообменной является одна и та же среда. Аккумулирующая среда может быть твердой, жидкой, газообразной или двухфазной (жидкость плюс газ).

б. Косвенное аккумулярование: энергия аккумулируется только посредством теплообмена (например, теплопроводностью через стенки резервуара) либо в результате массообмена специальной теплообменной среды (в жидком, двухфазном или газообразном состоянии). Собственно аккумулярующая 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).

в. Полупрямое аккумулярование: процесс протекает как в случае б), за исключением того, что аккумулярующая емкость теплообменной среды играет более важную роль (например, аккумулярование горячей нефти с твердой

насадкой).

г. Сорбционное аккумулирование: в этом случае используется способность некоторых аккумулирующих сред абсорбировать газы с выделением тепла (и поглощением тепла при десорбции газа). Передача энергии может происходить непосредственно в форме тепла или с помощью газа,

## **2. Масса аккумулирующей среды.**

а. Постоянная масса ( $dm_{ак} = 0$ ): обычно это случай косвенного аккумулирования. Однако может иметь место и прямое аккумулирование, если перемещаемая часть массы после охлаждения (при разрядке) или нагрева (при зарядке) полностью возвращается в аккумулятор (вытеснительное аккумулирование).

б. Переменная масса ( $dm_{ак} \neq 0$ ): это всегда случай прямого аккумулирования.

## **3. Объем аккумулятора.**

а. Постоянный объем ( $dV_{ак} = 0$ ): этот случай соответствует аккумулированию в закрытых (или с малым изменением объема) резервуарах.

б. Переменный объем ( $dV_{ак} \neq 0$ ): этот случай соответствует аккумулированию при атмосферном давлении или со специальным компрессорным оборудованием.

## **4. Давление в аккумуляторе.**

а. Постоянное давление ( $dp_{ак} = 0$ ).

б. Переменное (скользящее) давление ( $dp_{ак} \neq 0$ ).

### **4.3. Системы аккумулирования**

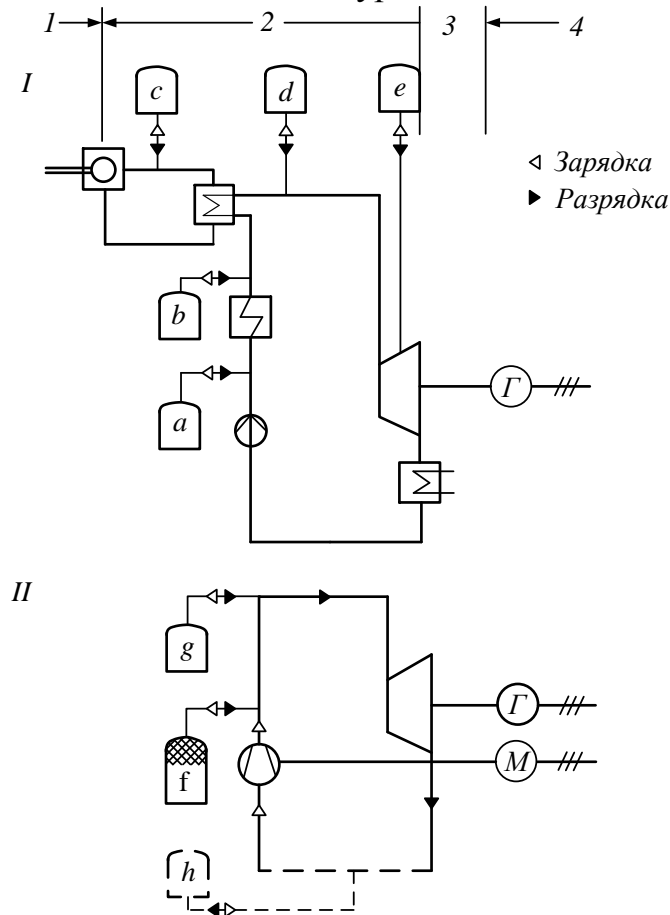
Для выполнения своих функций аккумулирующая система должна иметь помимо аккумулирующих сосудов и их внутренних устройств также и внешнее оборудование. При тепловом аккумулировании (как в тепловых процессах промышленных установок, так и в районных отопительных системах) для зарядки и разрядки могут понадобиться насосы, теплообменники, испарители, клапаны, трубопроводы.

Основные варианты систем аккумулирования для энергетических установок показаны на рис. 4.2. В основу классификации положено деление на безнасосные и насосные системы аккумулирования энергии.

Безнасосные системы аккумулирования получают энергию для зарядки из теплового цикла энергетической установки. В верхней части рис. 4.2 показаны безнасосные системы аккумулирования:

- а) система аккумулирования энергии посредством сжатых газов, в частности, для газотурбинных циклов;
- б) система аккумулирования с регенеративным подогревом питательной воды паровых циклов;
- с) система аккумулирования тепла первичного цикла для тепловых энергетических установок с отдельными теплообменным и рабочим циклами (аналогично тому, как это делается в солнечных теплоэнергетических установках);

d, e) системы аккумулирования тепла в рабочем цикле посредством аккумулирования насыщенного или перегретого пара и высокотемпературного аккумулирования тепла в газовых турбинах.



**Рис. 4.2. Основные варианты систем теплового аккумулирования для энергоустановок:**

I – безнасосные системы аккумулирования; II – насосные системы аккумулирования;

1 – первичная энергия; 2 – преобразование энергии; 3 – механическая энергия;

4 – электрическая энергия.

Дальнейшая классификация безнасосных систем аккумулирования связана с выделением двух групп:

- включенные в энергоустановку системы аккумулирования с установкой базисной нагрузки, которая способна покрыть такую нагрузку без использования систем аккумулирования, или с основной турбиной для базисной нагрузки и отдельной пиковой турбиной, или с основной турбиной, способной нести повышенную нагрузку, которая покрывает также и пиковую нагрузку);
- безнасосные системы аккумулирования с отдельным преобразователем энергии (парогенератором) и отдельным двигателем (турбиной для пиковой нагрузки).

Кроме того, следует отличать аккумулирование с постоянными параметрами, при котором аккумулирующая среда отбирается из процесса и вводится в него из аккумулятора в одной и той же точке цикла (так называемое «обратимое аккумулирование»), от аккумулирования с переменными параметрами, при котором ввод среды осуществляется в другой точке (ниже по потоку), или со значительно более низкими параметрами.



Насосные системы аккумулирования показаны в нижней части рис. 4.2:

- f) система пневматического аккумулирования с отдельным аккумулятором теплоты сжатия или без него;
- g, h) системы аккумулирования с использованием процесса теплового насоса (например, с паровым компрессором), с верхним (g) и нижним (h) аккумуляторами; один из них, например нижний, может быть заменен окружающей средой.

Насосные системы аккумулирования заряжаются обычно от электрической сети и поэтому могут быть подключены в любом месте сети. Таким образом, они могут и не входить в состав энергетической установки. Были предложены также входящие в состав энергоустановки насосные системы аккумулирования, заряжаемые механической энергией от газовой или паровой турбины.

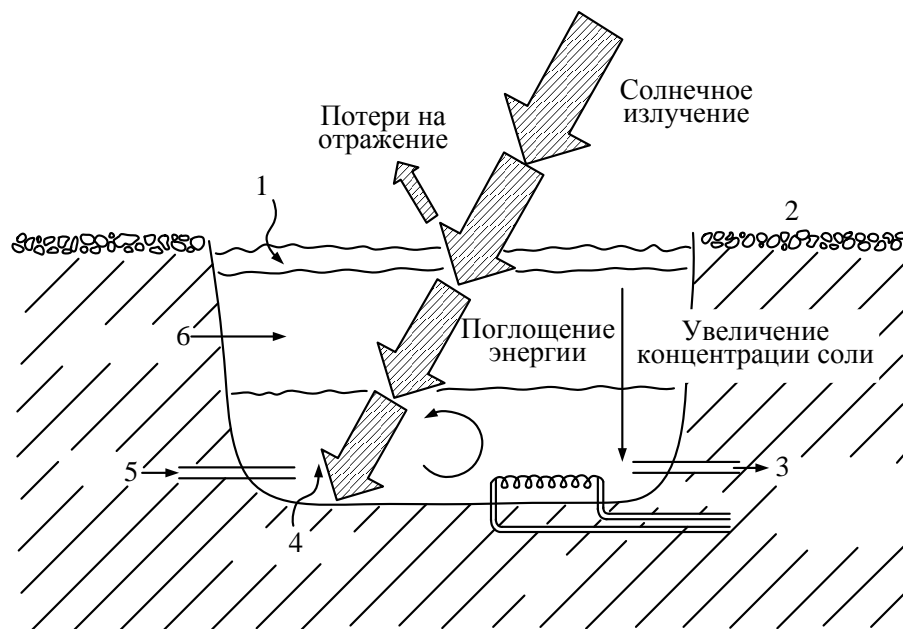
Верхний аккумулятор обычно имеет параметры (давление, температуру) выше параметров окружающей среды, тогда как параметры нижнего примерно такие же, как и у окружающей среды, которая, таким образом, может служить нижним аккумулятором (системы аккумулирования с тепловым источником). Насосные системы аккумулирования могут быть спроектированы и так, что окружающая среда используется в качестве верхнего аккумулятора, тогда как параметры нижнего аккумулятора выбираются много ниже, чем у окружающей среды (системы аккумулирования с низкотемпературным теплоприемником). В этом случае тепло для процесса отбирается из окружающей среды, а нижний (низкотемпературный) аккумулятор отбирает отработанное тепло и нагревается. Плотность запасаемой эксергии таких систем с «отрицательной эксергией» может быть весьма высока (в пределе бесконечна при 0 °K).

Рассмотренная выше классификация важна для оценки эффективности системы аккумулирования, мощности и скорости зарядки и разрядки, для выбора режима работы, а также для контроля функционирования.

#### **4.4. Тепловое аккумулирование за счет изменения градиента концентрации соли и использования теплоты фазового перехода**

**Солнечный бассейн**, где коллектор и аккумулятор совмещены, является частным случаем аккумулирования с использованием горячего теплоносителя (рис. 4.3). 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.

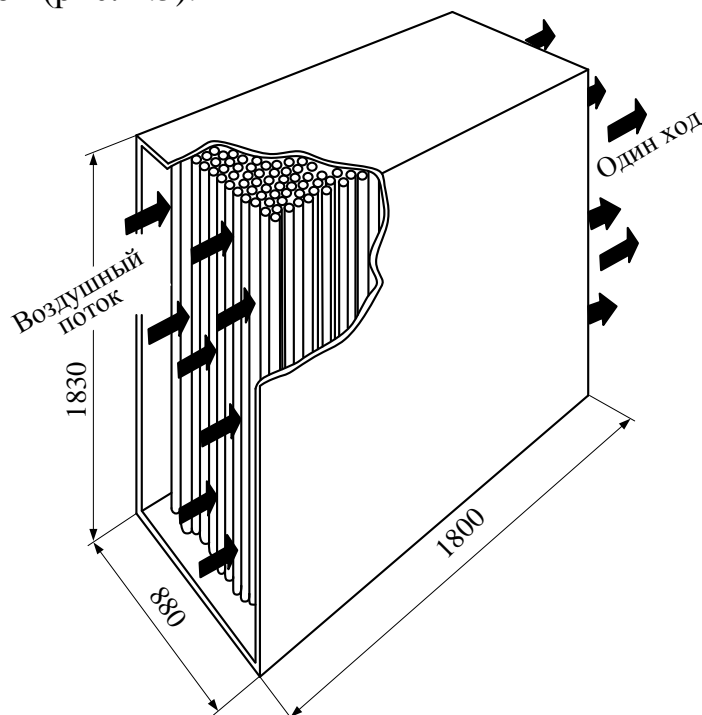
Таким способом можно достичь температуры воды 100 °C, а 90 °C является обычным расчетным значением в зонах с жарким климатом.



**Рис. 4.3. Схема солнечного бассейна с градиентом концентрации соли:**

1 – поверхностный слой воды; 2 – поверхность земли; 3 – выход горячего соляного раствора к потребителю тепла или к теплообменнику; 4 – конвективная (аккумулирующая) область; 5 – возврат холодного соляного раствора; 6 – неконвективный (изолирующий) слой

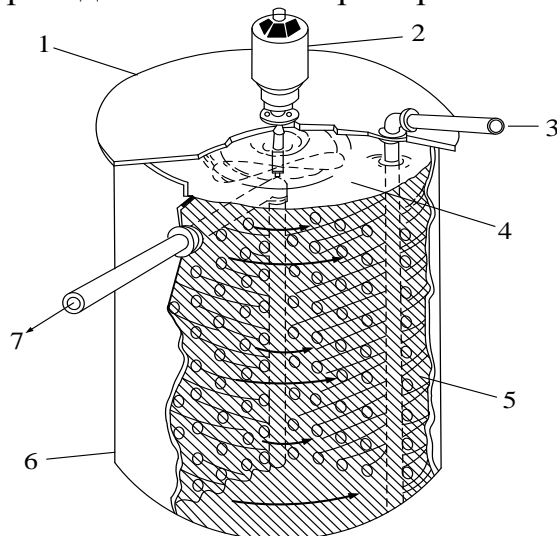
Были предложены и разработаны системы аккумулирования на основе использования **теплоты фазового перехода** для зарядки и разрядки воздухом (рис. 4.4) или водой (рис. 4.5).



**Рис. 4.4. Блок солнечных энергоаккумулирующих стержней с 2 400 кг  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $T_f=27,2^\circ\text{C}$ ) в полиэтиленовых цилиндрах для отопления квартиры**

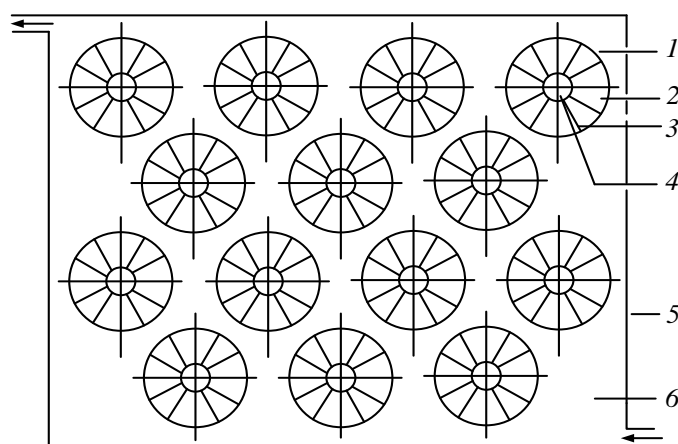
На рис. 4.6 показан вариант теплообменника с оребренными кольцевыми каналами с раздельными контурами зарядной и разрядной сред. Таким образом, теплообменник позволяет проводить одновременно зарядку и разрядку. Каждый теплообменный элемент состоит из внутренней и наружной трубок, тепло-

вой 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.



**Рис. 4.5. Агрегат CALMAC для аккумулирования теплоты фазового перехода на  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ :**

1 – съемная крышка; 2 – двигатель для перемешивания; 3 – вход воды; 4 – гидрат соли; 5 – пластиковый теплообменник; 6 – бак; 7 – выход воды



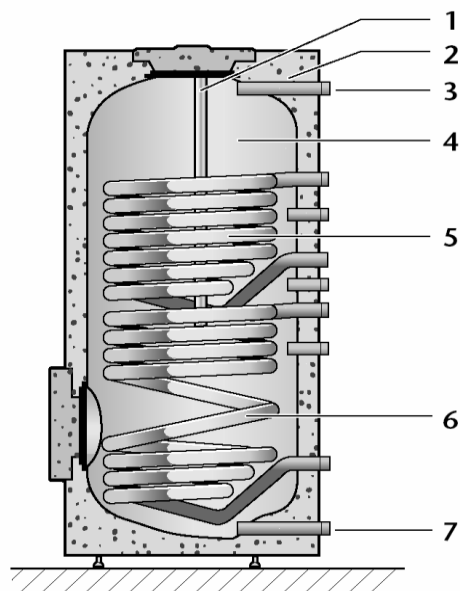
**Рис. 4.6. Теплообменник с оребренными кольцевыми каналами для аккумулирования энергии с использованием теплоты фазового перехода:**

1 – элемент теплообменного блока; 2 – термоаккумулирующее вещество; 3 – продольное ребро; 4 – горячий теплоноситель; 5 – резервуар (кожух); 6 – холодный теплоноситель для разрядки

## 4.5. Бойлеры для гелиотехнологий

### 4.5.1. Бивалентные бойлеры для приготовления горячей расходной воды

Бивалентные бойлеры (рис. 4.7) предусмотрены для гелиотермического приготовления горячей расходной воды. При необходимости есть возможность традиционного дополнительного нагрева от котла отопления.



**Рис. 4.7. Компоненты бивалентного бойлера:**

- 1 – магниевый анод-протектор; 2 – теплоизоляция; 3 – выход горячей воды; 4 – резервуар бойлера; 5 – верхний теплообменник (трубчатая нагревательная поверхность для дополнительного нагрева (подтапливания) от обычного котла отопления); 6 – теплообменник гелиоконтура (трубчатая нагревательная поверхность); 7 – вход холодной воды

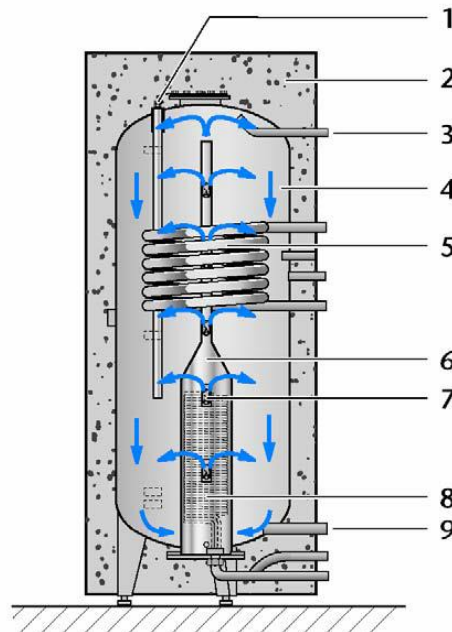
Конструкция теплообменника гелиоконтура с большой площадью поверхности в бивалентных бойлерах обеспечивает очень хорошую теплопередачу и вследствие этого – высокую разницу температур в гелиоконтуре между прямым и обратным трубопроводами.

Для того чтобы даже при наименьшей инсоляции всегда была горячая вода, в верхней части бойлера встроен теплообменник. С помощью этого теплообменника становится возможным дополнительный нагрев от традиционного котла отопления.

#### ***4.5.2. Бивалентные термосифонные бойлеры для приготовления горячей расходной воды***

Теплообменник гелиоконтура нагревает лишь относительно небольшое количество расходной воды почти до температуры прямого трубопровода гелиоконтура. Нагретая расходная вода поднимается по теплопроводной трубе 6 (рис. 4.8) непосредственно в зону готовности, в которой во время нормальной инсоляции уже через короткий промежуток времени достигается заданная температура. Вследствие этого не так часто требуется дополнительный нагрев (подтапливание) от традиционного котла отопления.

В зависимости от гелиотермического нагрева расходная вода поднимается вверх лишь до тех пор, пока не достигнет слоя с такой же самой температурой. После этого открываются гравитационные заслонки 7 (рис. 4.8), управляемые подъёмной силой. Таким способом бойлер нагревается послойно сверху вниз (рис. 4.9).



**Рис. 4.8. Устройство термосифонного бойлера:**

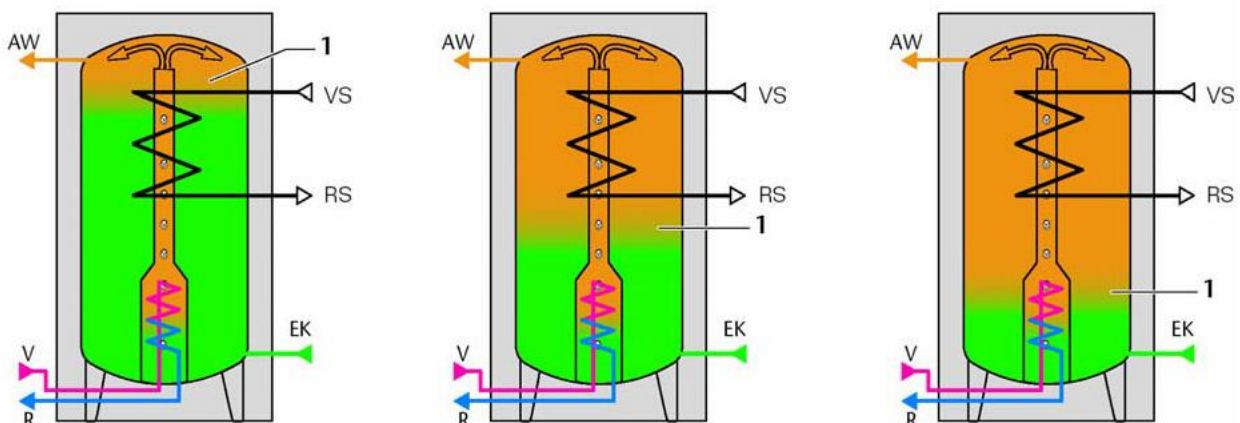
- 1 – магниевый анод-протектор; 2 – теплоизоляция; 3 – выход горячей воды; 4 – резервуар бойлера; 5 – верхний теплообменник (трубчатая нагревательная поверхность) для дополнительного нагрева (подтапливания) от обычного котла отопления; 6 – теплопроводная труба; 7 – гравитационная заслонка; 8 – теплообменник гелиоконтура (трубчатая нагревающая поверхность); 9 – вход холодной воды

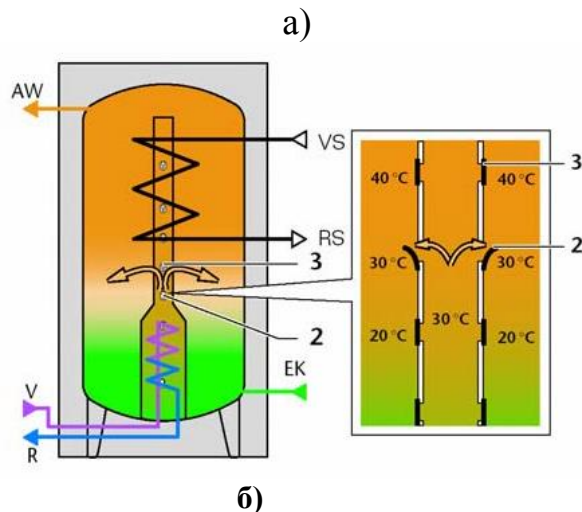
**Термосифонный принцип во время интенсивной инсоляции.** Нагретая вода быстро поднимается и через кратчайший промежуток времени попадает в зону готовности для потребления. Бойлер заполняется сверху вниз (рис. 4.9, 1).

**Термосифонный принцип во время малой инсоляции.** Если вода нагревается, например, только до 30 °С, она поднимается лишь до слоя с такой же температурой. Вода проходит сквозь открытые гравитационные заслонки в бойлер и нагревает соответствующую зону (рис. 4.9, 2).

Выход сквозь гравитационные заслонки прекращает дальнейший подъем воды по теплопроводной трубе и препятствует смешиванию со слоями воды более высоких температур (рис. 4.9, 3).

Так как в теплопроводной трубе возле теплообменника гелиоконтура вода поступает и движется только снизу, разница температур между обратным трубопроводом бойлера и гелиоколлектора остаётся большой. Таким способом обеспечивается высокий выход тепла.





**Рис. 4.9. Процесс заполнения термосифонного бойлера во время интенсивной инсоляции (а), выход горячей воды из теплопроводной трубы во время малой инсоляции (б):**

- 1 – разделительная прослойка между температурными зонами; 2 – открытая гравитационная заслонка в теплопроводной трубе; 3 – закрытая гравитационная заслонка; AW – выход горячей воды; EK – вход холодной воды; R – обратный трубопровод гелиоконтура; V – прямой трубопровод гелиоконтура

#### Вопросы к главе 4

1. Энергетический баланс теплового аккумулятора.
2. Классификация аккумуляторов тепла.
3. Системы аккумулирования.
4. Тепловое аккумулирование за счет изменения градиента концентрации соли и использования теплоты фазового перехода.
5. Бойлеры для гелиотехнологий.

## 5. Энергия ветра и возможности ее использования

### 5.1. Происхождение ветра, ветровые зоны России

Ветер возникает в результате постоянного циркуляционного неравномерного нагрева солнцем земной поверхности и является одним из неиссякаемых и достаточно мощных природных энергетических источников.

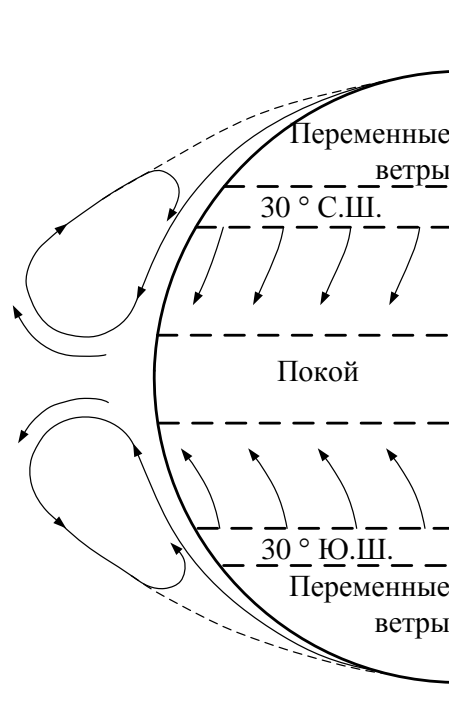
На экваторе у земной поверхности лежит зона затишья со слабыми переменными ветрами. На север и на юг от зоны затишья расположены зоны пассатов, которые вследствие вращения Земли с запада на восток имеют отклонение к западу. Таким образом, в северном полушарии постоянные ветры приходят с северо-востока, в южном с юго-востока, как показано на схеме рис. 5.1. Пассаты простираются примерно до  $30^\circ$  северной и южной широт и отличаются равномерностью воздушных течений по направлению и скорости. Средняя скорость юго-восточных пассатов северного полушария у поверхности земли достигает 6–8 м/сек. Эти ветры вблизи больших континентов нарушаются сильными годовыми колебаниями температуры и давления над материками. Высота слоя пассатов простирается от 1 до 4 км. Выше над пассатами находится слой переменных ветров, а над этим слоем находится зона антипассатов, дующих в направлении, противоположном направлению пассатов. Высота слоя антипассатов меняется от 4 до 8 км в зависимости от времени года и от места.

В субтропических широтах в поясах высокого давления зоны пассатов сменяются штилевыми областями. К северу и югу от этих областей приблизительно до  $70^\circ$  на всех высотах дуют ветры между западным и юго-западным румбами в северном полушарии и между западным и северо-западным – в южном полушарии. В этих широтах, кроме того, в атмосфере непрерывно возникают и затухают вихревые движения, усложняющие простую схему общей циркуляции атмосферы, показанную на рис. 5.1.

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

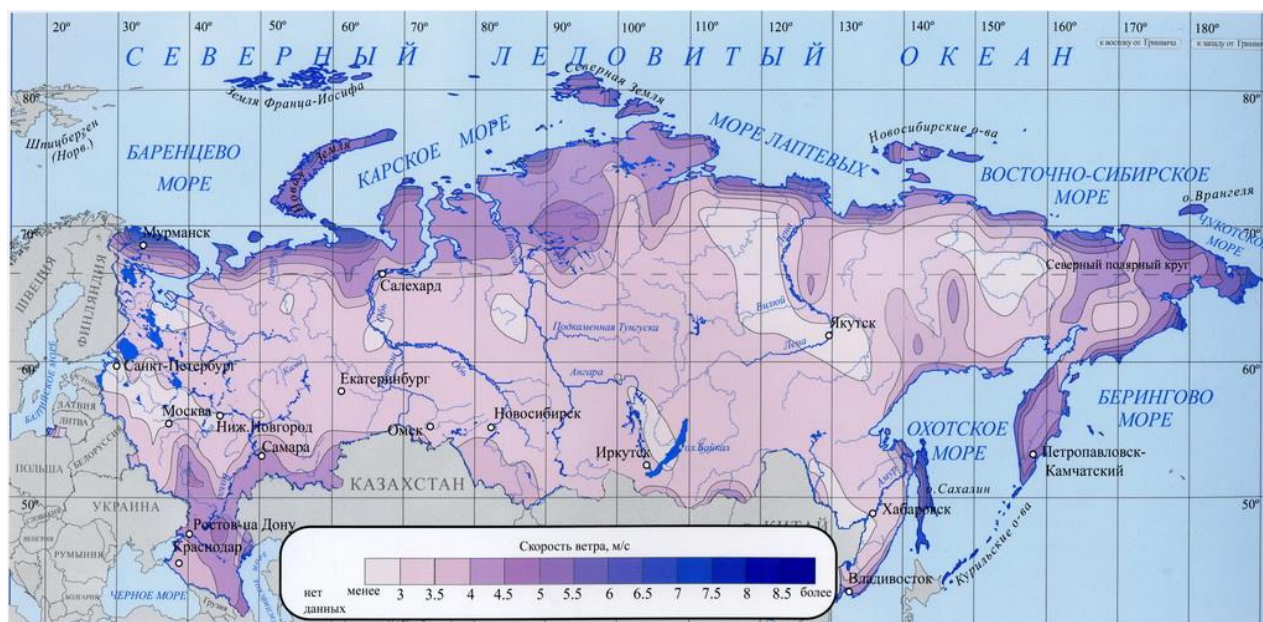
Различные зоны России имеют ветровые режимы, сильно отличающиеся один от другого. Значение среднегодовой скорости ветра в данном районе дает возможность приближенно судить о целесообразности использования ветродвигателя и об эффективности агрегата. Среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м для различных регионов России представлены на рис. 5.2.

Прибрежные зоны северной части страны, Каспийское побережье и северная часть Сахалина отличаются, как это видно на карте, высокой интенсивностью ветрового режима. Здесь среднегодовые скорости ветра превышают 6 м/сек. В этих районах часто наблюдаются ураганные ветры (выше 30 м/сек), которые сопровождаются снежными метелями и буранами. Поэтому в указанной зоне можно использовать только агрегаты с ветродвигателями высокой быстроходности (двух-трехлопастные), прочность которых рассчитана на ветровые нагрузки при скоростях ветра 40 м/сек. В Арктике и на побережье наиболее эффективно применение ветроэлектрических станций, работающих совместно с тепловым резервом, а также небольших ветроэлектрических агрегатов.



**Рис. 5.1. Схема общей циркуляции земной атмосферы**

Большинство областей европейской части России относятся к зоне средней интенсивности ветра. В этих районах среднегодовая скорость ветра составляет от 3,5 до 6 м/сек. К этой же зоне относится часть территории, лежащая юго-восточнее озера Байкал.



**Рис. 5.2. Среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м**

Третья зона занимает обширную территорию Восточной Сибири и Дальнего Востока, некоторых областей европейской части России. В этой зоне скорости ветра относительно невелики – до 3,5 м/с, и широкое применение здесь ветроэнергетических установок не рекомендуется.



## 5.2. Характеристики ветра

Важнейшей энергетической характеристикой ветра является его скорость  $v$ . Под действием ряда метеорологических факторов (возмущения атмосферы, изменения солнечной активности и др.), а также из-за влияния рельефа местности скорость и направление ветра изменяются по случайному закону.

Мгновенная скорость ветра определяет динамическое воздействие воздушного потока на ветродвигатель и влияет на работу автоматических систем регулирования. Количество энергии, которую сможет вырабатывать ветроэлектрическая установка, зависит в первую очередь от усредненной скорости ветра как во времени, так и по площади поверхности, ометаемой ветроколесом.

Средняя скорость ветра  $v_{\text{ср}}$  за выбранный промежуток времени определяется отношением суммы измеренных значений мгновенной скорости  $v_i$  к числу измерений  $n$

$$v_{\text{ср}} = \frac{\sum v_i}{n}. \quad (5.1)$$

Среднесуточную скорость  $v_{\text{сут}}$  находят делением на 24 суммы среднечасовых скоростей  $v_{\text{ч}}$ , а среднегодовую  $v_{\text{г}}$  – делением на 365 суммы всех  $v_{\text{сут}}$  за год.

Поскольку скорости ветра меняются в различное время суток, разные месяцы и сезоны, при выборе места размещения ветростанции, при аэродинамических и прочностных расчетах ВЭУ, при проектировании механизмов, их регулировании и ориентации рассматривают графики суточного, месячного и сезонного распределения скоростей.

Важной характеристикой ветра является вертикальный профиль скоростей в приземном слое. Влияние земной поверхности на скорости и направление ветра уменьшается по мере увеличения высоты, когда скорость постепенно возрастает, а порывистость и ускорение потока снижается. Градиент скоростей летом, как правило, меньше, чем зимой, когда вертикальный перепад температур относительно небольшой.

При адиабатическом градиенте вертикальный профиль ветра  $v = f(h)$  аппроксимируется следующей формулой, позволяющей получить осредненные данные

$$v = v_1 \left( \frac{h}{h_1} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (5.2)$$

где  $v_1$  – скорость ветра, измеренная вблизи земли на высоте  $h_1$ ;

$v$  – искомая скорость на высоте  $h$ .

С точки зрения эффективности работы ветроэлектрической установки направление ветра обычно играет меньшую роль. Однако в различных ландшафтах ветры разных румбов имеют неодинаковую порывистость и скорость. Их повторяемость определяют по розе ветров – графику, показывающему, какой процент общего времени года ветер имеет то или иное направление. Угловые градиенты скорости существенно влияют на работу механизмов автомати-

ческой ориентации и на величину гироскопических нагрузок.

Кинетическая энергия воздушного потока определяется известным соотношением

$$E_{\text{возд}} = \frac{mV^2}{2}. \quad (5.3)$$

Масса воздуха, протекающая через поперечное сечение  $F$  со скоростью  $V$ , равна

$$m = \rho FV, \quad (5.4)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха ( $\rho = 1,23$  кг/м<sup>3</sup> при температуре 15 °С и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.)

Подставив (5.4) в выражение кинетической энергии (5.3), получим:

$$E_{\text{возд}} = \frac{\rho FV^3}{2}, \quad (5.5)$$

откуда следует, что энергия ветра изменяется пропорционально кубу его скорости.

Соотношение (5.5) для круглого сечения  $F = \pi R^2$  может быть записано в виде

$$E_{\text{возд}} = \frac{\rho \pi R^2 V^3}{2}, \quad (5.6)$$

где  $R$  – радиус сечения, м.

Таким образом, кинетическая энергия ветра пропорциональна кубу его скорости и площади поперечного сечения  $F$ . Энергии ветра свойственны низкая плотность и нестабильность. Именно это обстоятельство обуславливает трудности и создает ограничения для использования энергии ветра в широких масштабах. Для увеличения выходной мощности ветроэлектрических установок приходится увеличивать диаметр ветроколеса и обеспечивать оптимальные параметры профиля лопастей.

### 5.3. Классификация ветродвигателей по принципу работы и их основные характеристики

Существующие системы ветродвигателей по схеме устройства ветроколеса и его положению в потоке ветра разделяются на три класса.

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

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

- а) карусельные, у которых нерабочие лопасти либо прикрываются ширмой, либо располагаются ребром против ветра;
- б) роторные ветродвигатели системы Савониуса;
- в) ветродвигатели Дарье.

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

Кинетическая энергия ветра (5.1) преобразуется ветродвигателем в механическую энергию, и далее в зависимости от назначения ветроустановки эта энергия с помощью генераторов, преобразователей или исполнительных механизмов может быть преобразована в электрическую, тепловую, химическую, механическую или другие виды энергии

В механическую энергию  $E_{\text{мех}}$  ветродвигатель может преобразовать только часть полной энергии воздушного потока  $E_{\text{возд}}$ , проходящего через сечение ветроколеса, определяемую типом двигателя и режимом его работы, что оценивается коэффициентом использования энергии ветра  $\xi$ . Максимально возможное значение коэффициента  $\xi = 0,593$ . Его называют теоретическим пределом Бетца. Впервые этот коэффициент для ветродвигателя, работающего без потерь, был получен Н. Е. Жуковским. В практических расчетах учитывают влияние на величину  $\xi$  типа ветроколеса, в результате чего  $\xi$  уменьшается и составляет 0,18–0,48.

Меньшее значение  $\xi$  относится к многолопастным тихоходным ветро-электрическим установкам с вертикальной осью вращения, большее – к горизонтально-осевым ветроэнергетическим установкам с двумя-тремя лопастями типа «Пропеллер».

Быстроходностью называется отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра:

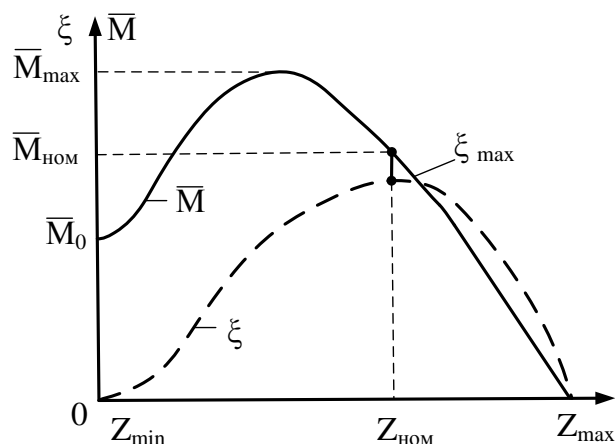
$$Z = \frac{\omega R}{V}. \quad (5.7)$$

Горизонтально-осевые ветроэнергетические установки в зависимости от типа ветроколеса и быстроходности, разделяются на три группы:

- а) ветродвигатели многолопастные, тихоходные, с быстроходностью  $Z_n \leq 2$ .
- б) ветродвигатели малолопастные, тихоходные, в том числе ветряные мельницы, с быстроходностью  $Z_n > 2$ .
- в) ветродвигатели малолопастные, быстроходные,  $Z_n \geq 3$ .

Коэффициенты  $\xi$  и  $Z$  являются главными параметрами, характеризующими эффективность ветротурбины, – они определяют среднюю выработку электроэнергии на конкретной установке.

В работе ветроустановки выделяют два предельных режима: режим с постоянным коэффициентом быстроходности  $Z$  и, следовательно, с постоянным коэффициентом использования энергии ветра  $\xi$ , и режим с постоянной частотой вращения ветроколеса и, следовательно, с переменным коэффициентом  $\xi$ . Характеристика ветроколеса обычно дается в виде зависимостей коэффициента  $\xi$  и вращающего момента  $M$  от величины  $Z$  (рис. 5.3).



**Рис. 5.3. Мощностные и моментные характеристики ветродвигателя**

Вместо момента  $M$  откладывается значение относительного момента

$$\bar{M} = \frac{2M}{\pi R^3 \rho v^2}. \quad (5.8)$$

Основными величинами, характеризующими ветряк с аэродинамической точки зрения, являются:  $Z_{\text{ном}}$  – нормальная скорость или нормальное число модулей, при котором коэффициент использования энергии ветра имеет максимальное значение  $\xi_{\text{max}}$ ;  $\bar{M}_{\text{ном}}$  – нормальный относительный крутящий момент, развиваемый ветряком при нормальном числе модулей;  $\bar{M}_0$  – начальный относительный момент или момент трогания с места; при этом  $Z = 0$ ;  $\bar{M}_{\text{max}}$  – максимальный относительный момент, который может развить ветряк;  $Z_{\text{max}}$  – синхронная скорость, т.е. число модулей, при котором  $\bar{M} = 0$ .

Отношение  $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$  определяет перегрузку, отношение  $\frac{M_0}{M_{\text{max}}}$  – страгивание.

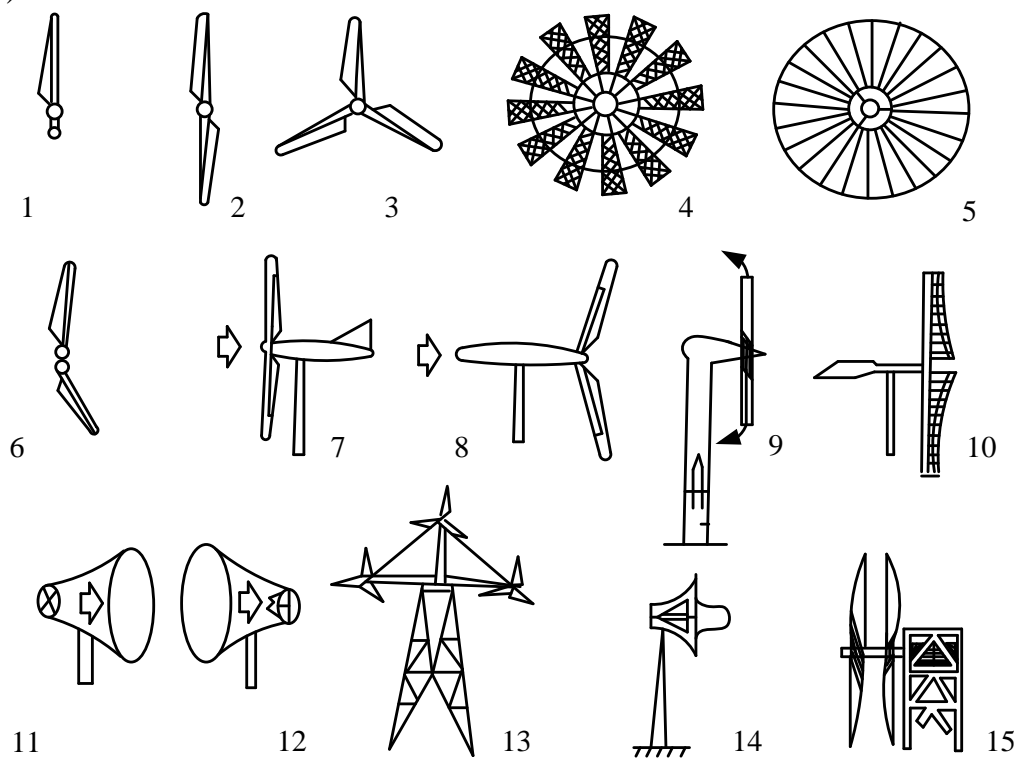
Важной характеристикой ветроколеса является также число лопастей. В большинстве применяемых в мире ВЭУ число лопастей не превышает четырех, при этом генерируемая мощность зависит в основном от ометаемой площади и мало зависит от числа лопастей.

#### 5.4. Конструкция и основные типы горизонтально-осевых ветротурбин

В горизонтально-осевых ветроэнергетических установках ветровое колесо имеет крыловидную форму и вращается в вертикальной плоскости, перпендикулярной направлению ветра, а ось ветроколеса параллельна потоку. Основной вращающей силой у колес этого типа является подъемная сила лопастей.

Ветротурбины с горизонтальной осью вращения могут быть выполнены с различным числом лопастей: от однолопастных устройств с контргрузами до многолопастных. Система, на которой укреплен ветротурбина, выполняется поворотной, ориентирующей по направлению ветра с помощью хвостового оперения или виндрозы. Для ограничения частоты вращения ветроколеса при большой скорости ветра применяется способ установки лопастей во флюгерное

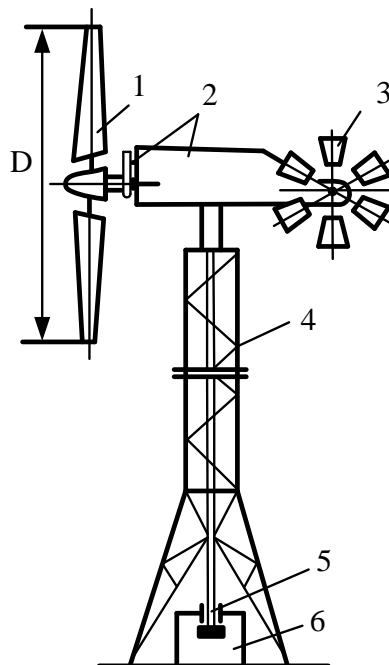
положение, а также устройства для вывода ветроколеса из-под ветра. Лопасти могут быть непосредственно закреплены на валу ветроколеса или же вращающий момент может передаваться от его обода через вторичный вал к генератору или другой рабочей машине. Ветроприемные устройства 1–3 и 6–15 используют для своей работы подъемную силу профилей, а 4,5 – силу сопротивления (рис. 5.4).



**Рис. 5.4. Ветроприемные устройства с горизонтальной осью вращения:**

1 – однолопастное ветроколесо; 2 – двухлопастное; 3 – трехлопастное; 4 – многолопастное; 5 – многолопастное велосипедного типа; 6 – комбинированное ветроколесо с симметричным и несимметричным профилем; 7 – ветроколесо, направленное навстречу потоку; 8 – ветроколесо, расположенное по потоку (за башней); 9 – ветроколесо с пневматической передачей мощности; 10 – парусное крыло; 11 – ветроколесо с диффузором; 12 – ветроколесо с концентратором энергии; 13 – многоветротурбинное с несколькими ветроколесами; 14 – ветроколесо диаметрального типа с диффузором; 15 – ветроколеса встречного вращения

Горизонтально-осевая ветроэнергетическая установка (рис. 5.5) содержит трехлопастную головку ветродвигателя 1, трансмиссию (мультипликатор) 2, виндрузу 3, вал отбора мощности 5 и электрогенератор 5. Гондола установлена на ферменной сварной вышке 4. Головка ветродвигателя имеет устройства ручного управления и автоматической стабилизации скорости вращения ветроколеса в случае изменения скорости ветра  $v$ . Для ориентации ветродвигателя по направлению ветра в задней части гондолы установлена виндруза 3, приводящая в движение механизм поворота гондолы при изменении направления ветра. К выходному валу трансмиссии редуктором присоединен вал отбора мощности 5 с генератором 6



**Рис. 5.5 Конструктивная схема ВЭУ с горизонтальной осью вращения типа «Пропеллер»:**

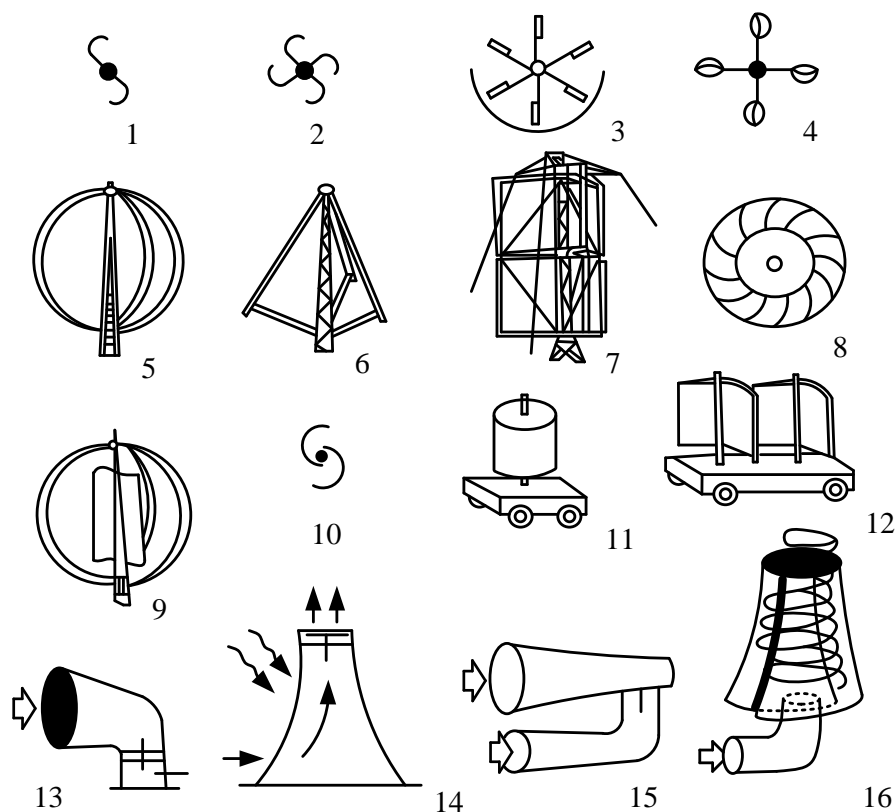
1 – рабочая лопасть; 2 – трансмиссия (мультипликатор); 3 – виндроза; 4 – башня;  
5 – вал отбора мощности; 6 – электрогенератор

## **5.5. Конструкция и основные типы вертикально-осевых ветротурбин**

Ветротурбины с вертикальной осью вращения имеют некоторые преимущества перед ветроприемными устройствами с горизонтальным расположением оси. У них отсутствуют узлы для ориентации на ветер, что упрощает конструкцию и снижает гироскопические нагрузки. Разработано большое количество разнообразных устройств с вертикальной осью вращения (рис. 5.6), в которых для создания вращающего момента используются силы сопротивления и подъемная сила рабочих лопастей.

Это устройства с пластинчатыми 8, чашеобразными или турбинными элементами 4, а также роторами Савониуса с лопастями S-образной формы 1–3, 10 (рис. 5.6). Устройства такого типа имеют большой начальный момент, но меньшую быстроходность и мощность по сравнению с ротором француза Дарье, который в 1920 г. предложил конструкцию 5–7, 9 (рис. 5.6). Этот ротор интенсивно разрабатывают, начиная с 1970 г., специалисты во многих странах. В настоящее время ветродвигатель Дарье может рассматриваться в качестве основного конкурента ветродвигателей крыльчатого типа.

В роторе другого типа с вертикальной осью вращения используется эффект Магнуса (физическое явление, возникающее при обтекании вращающегося тела потоком жидкости или газа, при этом образуется сила, действующая на тело и направленная перпендикулярно направлению потока.); к таким роторам с вращающимися цилиндрами можно отнести конструкции Мадараса и Флеттнера 11, 12 (рис. 5.6). Эти устройства способны приводить в движение суда или сухопутные транспортные средства.

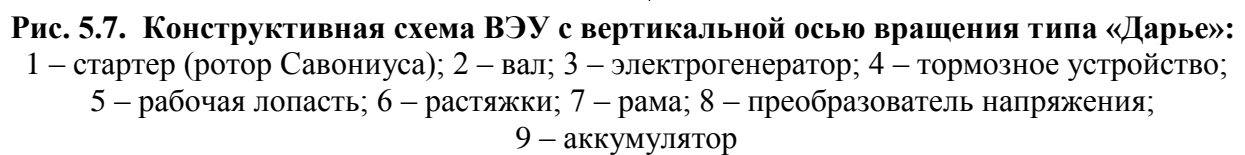


**Рис. 5.6. Ветроприемные устройства с вертикальной осью вращения:**

1 – ротор Савониуса; 2 – ротор Савониуса многолопастный; 3 – ротор пластинчатый; 4 – ротор чашечный; 5 – ротор Дарье 0-образный; 6 – ротор Дарье А-образный; 7 – ротор с прямыми крыловыми лопастями (Girromill); 8 – ветротурбина с криволинейными пластинчатыми лопастями; 9 – роторы Дарье 0-образный и Савониуса; 10 – ротор Савониуса щелевой; 11 – ротор с использованием эффекта Магнуса; 12 – ротор с несущими парусными поверхностями; 13 – ветроколесо с дефлекторным устройством; 14 – солнечно-ветровое устройство; 15 – ветроколесо с трубой Вентури; 16 – ветроколесо с вихревым устройством

ВЭУ с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в произвольном положении. Кроме того, такая схема позволяет за счет удлинения вала расположить редуктор с генератором в основании башни (рис. 5.7).

К наиболее распространенным типам вертикально-осевых ветроколес относится ротор Дарье. В нем вращающий момент создается подъемной силой, возникающей на двух или трех тонких изогнутых несущих поверхностях, имеющих аэродинамический профиль. Подъемная сила максимальна в тот момент, когда лопасть с большой скоростью пересекает набегающий воздушный поток. Ротор Дарье раскручиваться самостоятельно не может, поэтому для его запуска обычно используется генератор, работающий в режиме двигателя, или стартер, носящий название ротора Савониуса. Это колесо также приводится в движение силой сопротивления. Его лопасти выполнены из тонких изогнутых листов прямоугольной формы, отличаются простотой и дешевизной. Вращающий момент создается благодаря различному сопротивлению, оказываемому воздушному потоку вогнутой и выгнутой лопастями ротора. Из-за большого геометрического заполнения это ветроколесо обладает большим крутящим моментом.



1. Происхождение ветра, ветровые зоны России.
2. Характеристики ветра.
3. Классификация ветродвигателей по принципу работы и их основные характеристики.
4. Конструкция и основные типы горизонтально-осевых ветротурбин.
5. Конструкция и основные типы вертикально-осевых ветротурбин.



## 6. Теория идеального ветряка

### 6.1. Понятие идеального ветряка

**Идеальным ветряком** называют ветроколесо, у которого:

- а) ось вращения параллельна скорости ветра;
- б) бесконечно большое число лопастей очень малой ширины;
- в) профильное сопротивление крыльев равно нулю, и циркуляция вдоль лопасти постоянна;
- г) потерянная скорость воздушного потока на ветроколесе постоянна по всей ометаемой поверхности ветряка;
- д) угловая скорость стремится к бесконечности.

Теорию идеального ветряка впервые разработал в 1914 г. В. П. Ветчинкин на основе теории идеального гребного винта. В этой работе он установил понятие коэффициента использования энергии ветра идеальным ветряком.

В 1920 г. проф. Н. Е. Жуковский изложил теорию «Ветряной мельницы НЕЖ», где сделал вывод коэффициента использования энергии ветра идеальным ветряком.

Теория идеального ветряка проф. Н. Е. Жуковского носит название классической теории; она устанавливает, что максимальный коэффициент использования энергии ветра идеальным ветряком равен 0,593.

Аналогичные теории были разработаны позднее также в нашей стране профессором Г. Х. Сабининым и академиком Г. Ф. Проскура. Наиболее полно, с точки зрения практического применения, теория идеального ветряка изложена профессором Г. Х. Сабининым, согласно которой коэффициент использования энергии ветра идеальным ветряком равен 0,686. Отличие этой теории от прежних теорий заключается в том, что при определении осевой силы давления потока на ветроколесо импульс сил подсчитывается по вихревому соленоиду в том месте, где он принял уже установившуюся цилиндрическую форму, а не в момент его образования, как принималось прежними теориями. Так как соленоид 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.

### 6.2. Классическая теория идеального ветряка

Представим равномерный поток ветра, набегающий на идеальное ветроколесо со скоростью  $V$  в сечении  $AA'$  (рис. 6.1). В сечении  $BB'$  на ветроколесе скорость будет  $V_1 = V - v_1$ , а на некотором расстоянии позади ветряка в сечении  $CC'$  скорость будет  $V_2 = V - v_2$ .

При этом вращающееся ветроколесо создаст подпор, вследствие чего скорость потока, по мере приближения к ветряку и некоторое время за ветряком, падает, как показано кривой I на рис. 6.1. Вместе с этим давление воздуха  $p$ , по мере приближения к ветряку, повышается (кривая II), и при прохождении через ометаемую поверхность оно резко падает. За ветряком образуется неко-

торое разрежение  $p_0 - p_2$ , которое, по мере удаления от ветряка, асимптотически приближается к нулю, т. е. восстанавливается нормальное давление (кривая III). Потерю скорости за идеальным ветряком можно установить при помощи уравнения Бернулли

$$p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} = p_0 + \frac{\rho V^2}{2}. \quad (6.1)$$

Так как  $p_2 < p_0$ , то  $V > V_2$ .

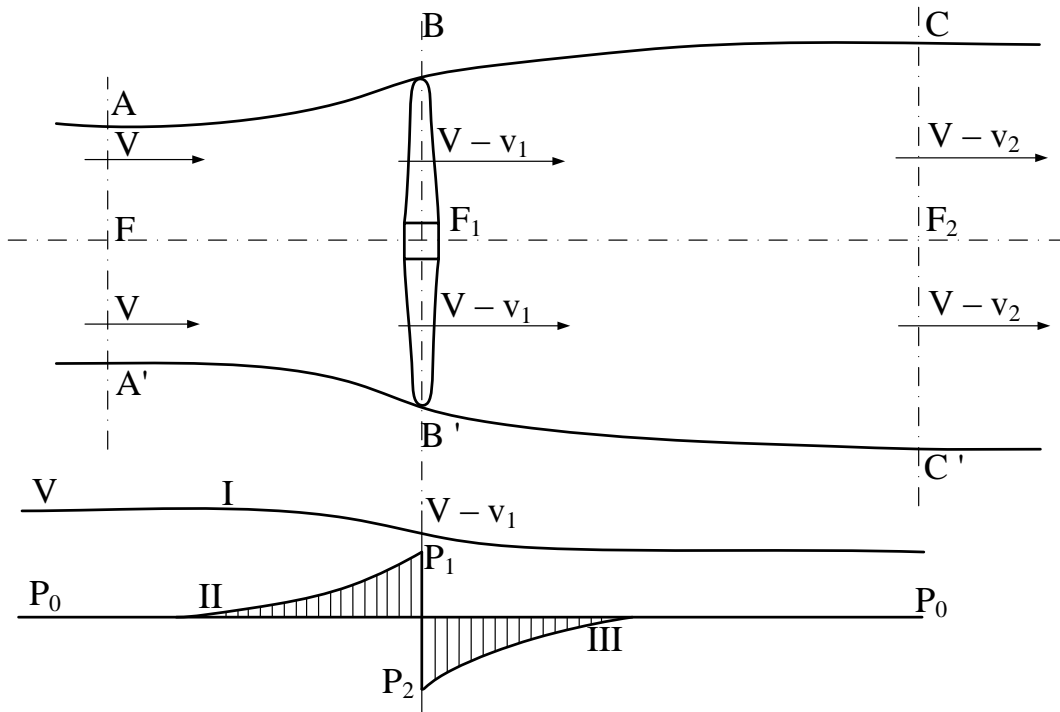


Рис. 6.1. Характеристика воздушного потока, протекающего через ветроколесо

Кинетическая энергия ветра перед ветряком равна  $\frac{mV^2}{2}$ , а за ветряком  $\frac{m(V - v_2)^2}{2}$ . Разность этих энергий затрачена на ветроколесе и, в случае отсутствия потерь, может быть получена как полезная работа

$$T_1 = \frac{mV^2}{2} - \frac{m(V - v_2)^2}{2}. \quad (6.2)$$

Преобразовав правую часть уравнения (6.2), получим

$$\frac{m}{2} [V^2 - (V - v_2)^2] = \frac{m}{2} (2Vv_2 - v_2^2) = mv_2 \left( V - \frac{v_2}{2} \right). \quad (6.3)$$

Следовательно

$$T_1 = mv_2 \left( V - \frac{v_2}{2} \right). \quad (6.4)$$

Энергию  $T_1$ , воспринятую ветроколесом, можно выразить как произведение из силы давления ветра  $P$  на скорость в плоскости ветряка  $(V - v_1)$ , т. е.

$$T_1 = P(V - v_1). \quad (6.5)$$

Сила лобового давления  $P$  равна приращению количества движения струи, проходящей через ометаемую поверхность, т. е.

$$P = mv_2. \quad (6.6)$$

Подставляя значение  $P$  в уравнение (6.5), получим

$$T_1 = mv_2(V - v_1). \quad (6.7)$$

Сравнивая уравнения (6.4) и (6.7) находим, что

$$mv_2 \left( V - \frac{v_2}{2} \right) = mv_2(V - v_1), \quad (6.8)$$

откуда

$$v_1 = \frac{v_2}{2}, \quad (6.9)$$

или

$$v_2 = 2v_1. \quad (6.10)$$

Равенство (6.10) показывает, что потеря скорости воздушного потока происходит не только в сечении ветроколеса, но также и на некотором расстоянии за ветряком, причём полная потеря скорости в два раза больше потери на ветроколесе.

Через ометаемую поверхность  $F$  ветроколеса протекает масса воздуха  $m$ , количество которой за 1 секунду будет равно

$$m = \rho FV. \quad (6.11)$$

Подставляя значение массы воздуха в выражение кинетической энергии ветра перед ветроколесом, получим:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{\rho FV^3}{2}. \quad (6.12)$$

Взяв отношение секундной работы, воспринятой идеальным ветроколесом (6.5) к той энергии ветра, которая протекала бы через сечение, равное ометаемой поверхности ветряка (6.12), получим идеальный коэффициент использования энергии ветра  $\xi_i$

$$\xi_i = \frac{P(V - v_1)}{F \frac{\rho V^3}{2}}. \quad (6.13)$$

Преобразуем это уравнение

$$\xi_i = \frac{P(V - v_1)}{F \frac{\rho V^3}{2}} = 2 \frac{P}{F \rho V^2} \frac{V - v_1}{V}. \quad (6.14)$$

здесь выражение

$$B = \frac{2P}{F \rho V^2} \quad (6.15)$$

называют коэффициентом нагрузки на ометаемую площадь, или коэффициентом лобового давления.

Подставив в это уравнение  $P = \rho F(V - v_1)v_2 = \rho F(V - v_1)2v_1$  и обозначив

$\frac{v_1}{V} = e$ , после сокращений получим

$$B = \frac{2\rho F(V - v_1)2v_1}{\rho F V^2} = \frac{4(V - v_1)v_1}{V^2} = 4e(1 - e). \quad (6.16)$$

Поступая так же с уравнением (6.13), для  $\xi_i$  получим

$$\xi_i = \frac{\rho F(V - v_1)^2 2v_1}{F \frac{\rho V^3}{2}} = \frac{4(V - v_1)^2 v_1}{V^3} = 4e(1 - e)^2. \quad (6.17)$$

Отношение  $\frac{v_1}{V} = e$  называют коэффициентом торможения.

Определим значение  $e$ , при котором  $\xi_i$  будет иметь максимальную величину. Для этого возьмём первую производную и приравняем её нулю, т. е.

$$\frac{d\xi_i}{de} = \frac{d}{de} [4e(1 - e)^2] = \frac{d}{de} (4e - 8e^2 + 4e^3) = 0, \quad (6.18)$$

или

$$\frac{d\xi_i}{de} = 4 - 16e + 12e^2 = 0; \quad (6.19)$$

откуда

$$3e^2 - 4e + 1 = 0. \quad (6.20)$$

Решая это равенство, находим, что  $\xi_i$  принимает максимальное значение, когда  $e = \frac{1}{3}$  при этом

$$\xi_i = 4 \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = 0,593. \quad (6.21)$$

Из уравнения (6.16) находим  $B$  коэффициент нагрузки на ометаемую площадь при максимальном  $\xi_i$

$$B = 4 \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right) = 0,888. \quad (6.22)$$

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. Потеря скорости в плоскости ветроколеса равна одной трети скорости ветра

$$v_1 = \frac{1}{3} V.$$

3. Полная потеря скорости ветра за ветроколесом в два раза больше потери скорости в плоскости ветроколеса

$$v_2 = \frac{2}{3} V.$$

Таким образом, скорость ветра за ветроколесом в три раза меньше скорости ветра перед ветроколесом.

4. Коэффициент нагрузки на ометаемую поверхность ветроколеса равен  $B = 0,888$ .

Задаваясь коэффициентом торможения  $e = \frac{v_1}{V}$  в пределах от 0 до 1 и подсчитывая с помощью уравнений (6.13) и (6.16), получим следующие значения коэффициентов  $\xi_i$  и  $B$  (табл. 6.1, рис. 6.2).

Таблица 6.1

Значения коэффициентов использования и нагрузки в зависимости от коэффициента торможения

$e = \frac{v_1}{V}$	0,100	0,200	0,333	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
$\xi_i$	0,324	0,512	0,593	0,576	0,500	0,384	0,252	0,128	0,036	0
$B$	0,360	0,640	0,888	0,960	1,000	0,960	0,840	0,640	0,360	0

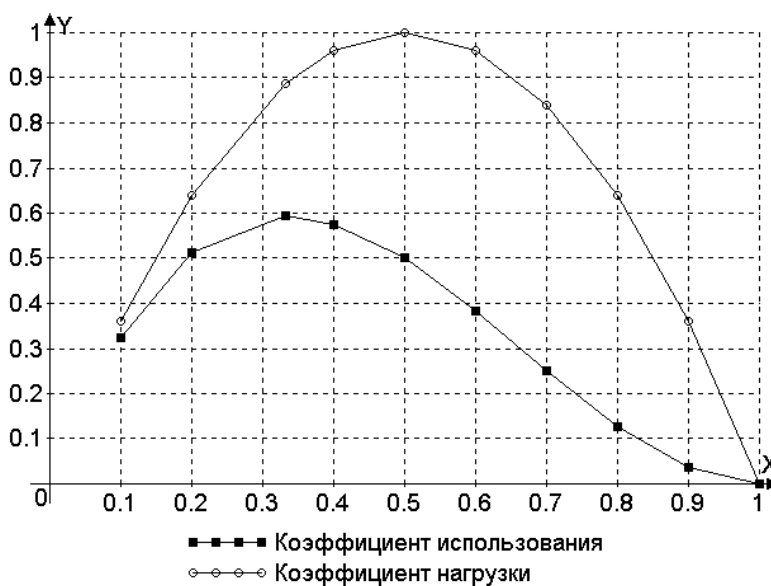


Рис. 6.1. Графики зависимости коэффициентов использования и нагрузки от коэффициента торможения

## Вопросы к главе 6

1. Понятие идеального ветряка.
2. Ученый впервые разработавший теорию идеального ветряка.
3. Теория «Ветряной мельницы».
4. Классическая теория идеального ветряка.

## 7. Теория реального ветряка

### 7.1. Работа элементарных лопастей ветроколеса. Первое уравнение связи

Выделим из лопастей ветроколеса двумя concentрическими окружностями с радиусами  $r$  и  $r + dr$  кольцевую поверхность  $dF = 2\pi r dr$ . Это кольцо на крыльях вырежет отрезки длиной  $dr$ , которые называются элементарными лопастями (рис. 7.1). Через все точки обеих окружностей проведем линии тока, образующие две поверхности  $ABC$ ,  $A'B'C'$  бутылёобразной формы (рис. 7.2). Жидкость, заключённую между этими поверхностями, назовём элементарной кольцевой струёй.

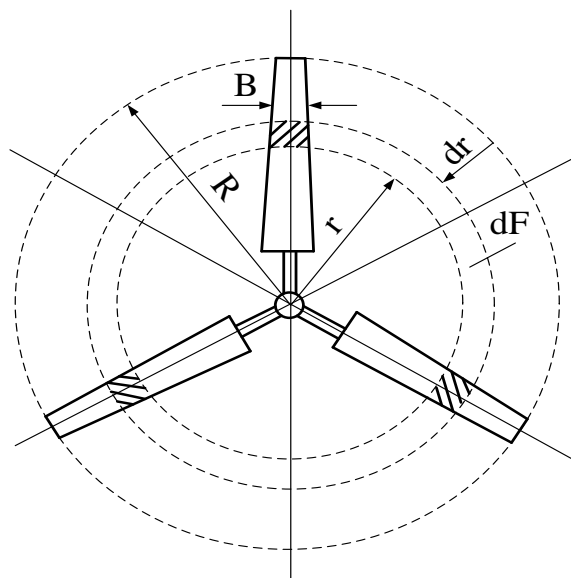


Рис. 7.1. Выделение элементарных лопастей на ветроколесе

Сделаем предположение, обычно принимаемое в аналогичных теориях, что разность давлений по обе стороны ветрового колеса, действующая на площадь кольца, получающегося от пересечения ометаемой плоскостью элементарной струи, воспринимается элементарными лопастями.

На основании этого составляем первое уравнение связи

$$2\pi r dr (p_1 - p_2) = i(dY \cos \beta + dX \sin \beta), \quad (7.1)$$

где  $Y$  – подъемная сила крыла, направленная перпендикулярно потоку;

$X$  – сила сопротивления крыла (лобовое сопротивление крыла), направленная по потоку;

$\beta$  – угол между плоскостью вращения ветроколеса и направлением воздушного потока, набегающего на крыло;

$i$  – число лопастей ветроколеса.

Для определения направления сил, действующих на элементарную лопасть, изобразим ее сечение на рисунке 7.3, где ось  $Z$  направлена по оси ветроколеса и ось  $x - x$  в плоскости его вращения;  $V$  – направление скорости ветра;  $W$  – направление скорости относительного потока, набегающего на элемент лопасти.

Разложим силу  $dR$ , действующую на элементарную лопасть, на две силы:  $dX$ , действующую по потоку, и  $dY$ , направленную перпендикулярно потоку.

Сила  $dX$  вызывает сопротивление элемента крыла;  $dY$  вызывает окружное усилие элемента крыла и называется подъёмной силой.

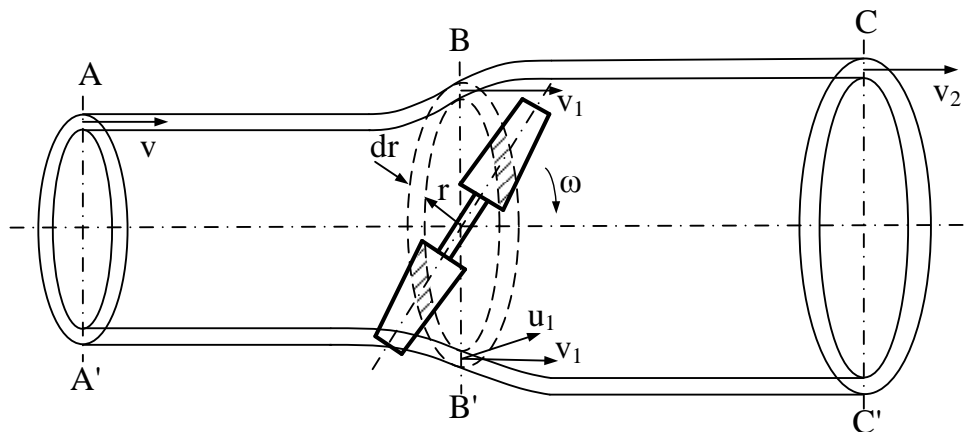


Рис. 7.2. Элементарная кольцевая струя

Вследствие вращения ветроколеса в плоскости  $x-x$  воздушный поток набегаёт на ветроколесо не со скоростью ветра  $V$ , а с относительной скоростью  $W$ , которая складывается геометрически из скорости ветра  $V$  и окружной скорости  $\omega r$ , где  $\omega$  угловая скорость и  $r$  – расстояние элемента лопасти от оси вращения ветроколеса.

Скорость потока, набегающего на элемент лопасти, в относительном движении будет равна

$$W = \sqrt{V_1^2 + (-\omega r - u_1)^2}, \quad (7.2)$$

где  $V_1 = V - v_1$  – скорость ветра в плоскости ветряка.

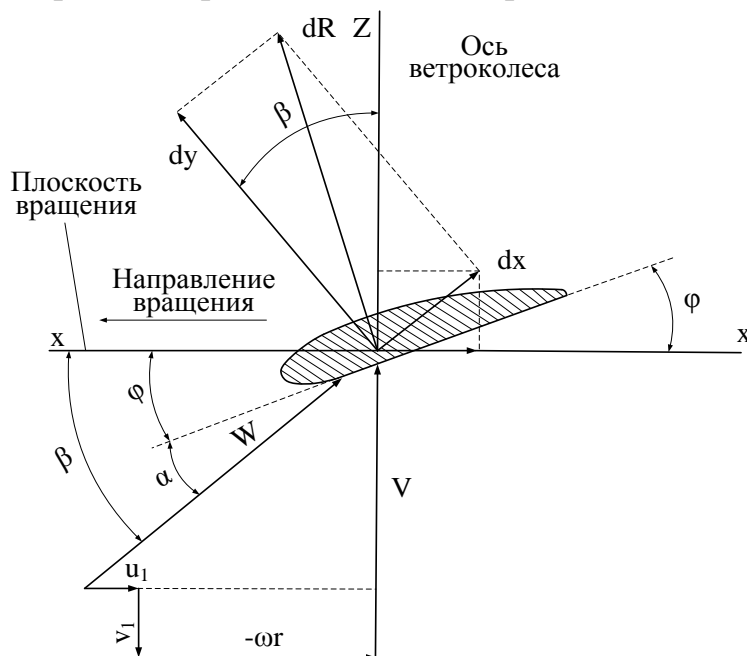


Рис. 7.3. План скоростей воздушного потока при набегаании его на элемент лопасти

Скорость  $u_1$  получается как реакция от крутящего момента, развиваемого лопастями. Эта скорость имеет направление, обратное моменту; её величина берётся как средняя для всей зоны, в которой работают лопасти. В действительности эта скорость перед ветроколесом равна нулю и непосредственно за

ветряком равна  $u_2$ . Так как закон изменения этой скорости неизвестен, то, как первое приближение, её принимают равной

$$u_1 = \frac{u_2}{2}. \quad (7.3)$$

Силы  $dY$  и  $dX$  можно выразить как

$$dY = C_y b dr \frac{\rho}{2} W^2, \quad (7.4)$$

$$dX = C_x b dr \frac{\rho}{2} W^2, \quad (7.5)$$

где  $b$  – ширина элемента лопасти по хорде.

Кроме того, на основании уравнения для лобового давления на ветряк (по теории идеального ветряка Г. Х. Сабинина) можем написать

$$p_1 - p_2 = \frac{P}{F_1} = \rho V v_2. \quad (7.6)$$

Подставляя вместо  $dY$  и  $dX$  и  $p_1 - p_2$  их значения в уравнение (7.1), получим

$$2\pi r dr \rho V v_2 = i \left( b dr C_y \frac{\rho}{2} W^2 \cos \beta + b dr C_x \frac{\rho}{2} W^2 \sin \beta \right); \quad (7.7)$$

после сокращения получим

$$2\pi r V v_2 = i b dr C_y \frac{W^2}{2} \cos \beta \left( 1 + \frac{C_x}{C_y} \operatorname{tg} \beta \right); \quad (7.7a)$$

или

$$4\pi r V v_2 = i b dr C_y W^2 \cos \beta \left( 1 + \frac{C_x}{C_y} \operatorname{tg} \beta \right). \quad (7.7b)$$

На основании рис. 7.3 можно ввести обозначение

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{\omega r + u_1}{V - v_1} = z_u, \quad (7.8)$$

которое называют числом относительных модулей.

Из уравнения (7.8) имеем

$$-\omega r - u_1 = -z_u (V - v_1), \quad (7.8a)$$

или

$$(-\omega r - u_1)^2 = z_u^2 (V - v_1)^2, \quad (7.8b)$$

и, зная, что  $V_1 = V - v_1$ , уравнение (7.2) можем переписать так

$$W = \sqrt{(V - v_1)^2 + z_u^2 (V - v_1)^2} = (V - v_1) \sqrt{1 + z_u^2}. \quad (7.9)$$

Заменим

$$\sin \beta = \frac{V - v_1}{W} = \frac{V - v_1}{(V - v_1) \sqrt{1 + z_u^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + z_u^2}}, \quad (7.10)$$



$$\cos \beta = \frac{\omega r + u_1}{W} = \frac{\omega r + u_1}{(V - v_1) \sqrt{1 + z_u^2}} = \frac{z_u}{\sqrt{1 + z_u^2}}, \quad (7.11)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{z_u}, \quad (7.12)$$

где **обратное качество крыла**

$$\frac{C_x}{C_y} = \mu, \quad (7.13)$$

и подставим их в уравнение (7.7б)

$$4\pi r V v_2 = ib C_y (V - v_1)^2 (1 + z_u^2) \frac{z_u}{\sqrt{1 + z_u^2}} \left(1 + \frac{\mu}{z_u}\right). \quad (7.7в)$$

Вводя в это уравнение  $e = \frac{v_1}{V}$  и заменив  $v_2$  его значением из равенства

$$v_2 = \frac{2v_1}{1 + \frac{v_1}{V}}, \text{ получим}$$

$$ib C_y = 8\pi r \frac{e}{(1 + e)(1 + e)^2} \frac{1}{(z_u + \mu) \sqrt{1 + z_u^2}}. \quad (7.14)$$

Это уравнение называется уравнением связи; оно связывает ширину лопасти и коэффициент подъемной силы с деформацией потока, характеризуемой величиной  $e$ .

Взяв сумму проекций сил элемента лопасти на касательную к окружности, по которой он движется, получим окружное усилие, развиваемое элементарными лопастями

$$dQ = ibdr \frac{\rho}{2} W^2 (C_y \sin \beta - C_x \cos \beta).$$

Подставляя сюда значение  $W$ ,  $\sin \beta$  и  $\cos \beta$  и вводя  $C_x = \mu C_y$ , получим

$$dQ = ibdr \frac{\rho}{2} (V - v_1)^2 (1 + z_u^2) C_y \frac{1 - \mu z_u}{\sqrt{1 + z_u^2}}. \quad (7.15)$$

Подставляя сюда значение  $ib C_y$  из уравнения (7.14) и сделав сокращения, получим

$$dQ = 4\pi r dr \rho \frac{e}{1 + e} V^2 \frac{1 - \mu z_u}{z_u + \mu}. \quad (7.16)$$

Момент относительно оси ветряка равен

$$dM = dQr = 4\pi r^2 dr \rho \frac{e}{1 + e} V^2 \frac{1 - \mu z_u}{z_u + \mu}. \quad (7.17)$$

Секундная работа элементарных лопастей

$$dT = dM \omega = 4\pi r dr \rho \frac{e}{1 + e} V^3 \frac{1 - \mu z_u}{z_u + \mu} z. \quad (7.18)$$

Секундная энергия далеко перед ветряком, заключенная в потоке, площадь сечения которого определяется площадью кольца, сметаемого элементарными лопастями, равна

$$dT_0 = 2\pi r dr \rho \frac{V^3}{2}. \quad (7.18a)$$

Поделив секундную работу элементарных лопастей на эту энергию, получим **элементарный коэффициент** использования энергии ветра

$$\xi = \frac{dT}{dT_0} = \frac{4e}{1+e} \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} z. \quad (7.19)$$

Умножив и разделив выражение (7.1.19) на  $(1-e)$  получим

$$\xi = 4e \frac{1-e}{1+e} \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \frac{z}{1-e}. \quad (7.19a)$$

Так как выражение  $4e \frac{1-e}{1+e}$  представляет **идеальный коэффициент использования энергии ветра**, то можем написать:

$$\xi = \xi_i \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \frac{z}{1-e} = \xi_i \eta, \quad (7.20)$$

где

$$\eta = \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \frac{z}{1-e}, \quad (7.21)$$

называют **относительным коэффициентом полезного действия** элементарного ветряка.

При большом числе модулей можно приблизительно считать:

$$\frac{z}{1-e} \cong z_u$$

и тогда

$$\eta = \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \frac{z}{1-e}. \quad (7.21a)$$

Напомним, что **числом модулей**, или **быстроходностью** ветродвигателя, называют отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра

$$Z = \frac{\omega R}{V}.$$

Число модулей элементов лопастей на радиусе  $r$  равно

$$z = \frac{\omega r}{V}. \quad (7.22)$$

Число модулей для любого радиуса  $r$  ветряка с известной быстроходностью  $Z$  может быть выражено так

$$z = Z \frac{r}{R}, \quad (7.23)$$

где  $R$  – радиус ветроколеса.

## 7.2. Второе уравнение связи

Момент относительно оси ветряка аэродинамических сил, действующих на элементарные лопасти, равен по величине и противоположен по знаку моменту количества движения, получаемого элементарной струёй, увлечённой ветряным колесом. Здесь предполагается, что в этом процессе принимает участие и присоединённая масса, так как в противном случае теорема Гельмгольца о сохранении вихря не была бы выполнена.

Второе уравнение связи выводим из рис. 7.3.

$$i(dY \sin \beta - dX \cos \beta)r = d(m_1 + m_2)2u_1r. \quad (7.24)$$

Но

$$d(m_1 + m_2) = 2\pi r dr \rho V.$$

Подставляя указанное уравнение и значения  $dY$  и  $dX$  из уравнений (7.4) и (7.5) в уравнение (7.24), получим

$$ibdr(C_y \sin \beta - C_x \cos \beta) \frac{\rho}{2} W^2 r = 2\pi r dr \rho V 2u_1r. \quad (7.24a)$$

Заменив в этом уравнении  $\sin \beta$  и  $\cos \beta$  их значениями из уравнений (7.10) и (7.11) и сделав сокращения, получим

$$ib \left( C_y \frac{1}{\sqrt{1+z_u^2}} - C_x \frac{z_u}{\sqrt{1+z_u^2}} \right) W^2 = 8\pi r V u_1. \quad (7.24б)$$

Подставляя сюда (7.13) и (7.9), получим

$$ibC_y \frac{1 - \mu z_u}{\sqrt{1+z_u^2}} (V - v_1)^2 (1 + z_u^2) = 8\pi r V u_1. \quad (7.24в)$$

Из этого равенства находим отношение  $\frac{u_1}{V}$ , для чего разделим правую и левую части на  $8\pi r V^2$  и заменим отношение  $\frac{v_1}{V}$  его значением  $e$ .

$$\frac{u_1}{V} = \frac{ibC_y}{8\pi r} (1 - e)^2 (1 - \mu z_u) \sqrt{1 + z_u^2}. \quad (7.25)$$

Подставляя из уравнения (7.14) значение  $\frac{ibC_y}{8\pi r}$  и проведя сокращения, получим

$$\frac{u_1}{V} = \frac{e}{1 + e} \frac{1 - \mu z_u}{z_u + \mu}. \quad (7.26)$$

Преобразуя уравнение (7.8), находим соотношение между  $z_u$  и  $z$

$$z_u = \frac{\omega r + u_1}{V - v_1} = \frac{\omega r}{V} \frac{V}{V - 1} + \frac{u_1}{V} \frac{V}{V - 1} = \frac{z}{1 - e} + \frac{u_1}{V(1 - e)}.$$

Подставим значение  $\frac{u_1}{V}$  из уравнения (7.2)

$$z_u = \frac{z}{1-e} + \frac{e}{1-e^2} \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu}. \quad (7.27)$$

$$z = z_u(1-e) - \frac{e}{1+e^2} \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu}. \quad (7.28)$$

Решаем это уравнение относительно  $z_u$

$$\begin{aligned} z_u^2 + \mu z_u - \frac{z_u z}{1-e} - \frac{\mu z}{1-e} - \frac{e}{1-e^2} + \frac{e}{1-e^2} \mu z_u &= 0; \\ z_u^2 - z_u \left( \frac{z}{1-e} - \mu - \frac{e}{1-e^2} \mu \right) - \frac{e}{1-e^2} - \mu \frac{z}{1-e} &= 0; \\ z_u &= \frac{1}{2} \left[ \frac{z}{1-e} - \mu \left( 1 + \frac{e}{1-e^2} \right) \right] \pm \\ &\pm \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \frac{z}{1-e} - \mu \left( 1 + \frac{e}{1-e^2} \right) \right]^2 + \frac{e}{1+e^2} + \mu \frac{z}{1-e}} = 0 \end{aligned} \quad (7.29)$$

Так как  $\mu$  обычно имеет малую величину, то, приняв  $\mu = 0$ , уравнения (7.28) и (7.29) можно упростить

$$z = z_u(1-e) - \frac{e}{z_u(1-e)}. \quad (7.28a)$$

$$z_u = z \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4e(1-e)}{z^2(1+e)}}}{2(1-e)} = z \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{\xi_i}{z^2}}}{2(1-e)}. \quad (7.29a)$$

Уравнения (7.14), (7.22) и (7.29) позволяют сделать полный аэродинамический расчёт ветроколеса для заданных  $\omega R$  и  $V$ , а также формы профиля крыла. При этом пользуются диаграммой  $C_y$  и  $C_x$ , построенной для данного профиля.

Задаваясь  $e$  в пределах 0,28 до 0,35 и наиболее выгодным углом атаки, по диаграмме  $C_y$  и  $C_x$  для данного профиля находят:  $\mu = \frac{C_x}{C_y}$ .

Подставляя значения  $z$ ,  $e$  и  $\mu$  в уравнение (7.29), находят число относительных модулей  $z_u$ . Далее, пользуясь уравнением (7.14), находят суммарную ширину лопастей  $ib$

$$ib = \frac{8\pi r}{C_y} \frac{e}{(1+e)(1-e)^2} \frac{1}{(z_u + \mu)\sqrt{1+z_u^2}}. \quad (7.30)$$

И, наконец, определяют угол заклинения лопасти  $\varphi$  на радиусе  $r$

$$\varphi = \text{arcctg} z_u - \alpha. \quad (7.31)$$

$C_y$  находят по диаграмме  $C_y$  по  $\alpha$ , построенной на основании экспериментальных данных.

### 7.3. Момент и мощность всего ветряка

Момент всего ветряка получим, проинтегрировав уравнение

$$dM = dQr = 4\pi r^2 dr \rho \frac{e}{1+e} V^2 \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu}$$

в пределах от  $r_0$  до  $R$ , где  $r_0$  – расстояние от оси ветряка до начала лопасти и  $R$  – расстояние от оси ветряка до конца лопасти

$$M = \int_{r_0}^R dM = \int_{r_0}^R 4\pi r^2 \rho \frac{e}{1+e} V^2 \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} dr. \quad (7.32)$$

Этот момент обычно выражают в отвлеченных величинах и обозначают через  $\bar{M}$  с чертой вверху. При этом правую и левую части равенства (7.32) делят на  $\pi R^3 \frac{\rho V^2}{2}$  и вводят обозначение  $\bar{r} = \frac{r}{R}$ , называемое **относительным радиусом**

$$\bar{M} = \int_{\bar{r}_0}^{\bar{R}} 8 \frac{e}{1+e} \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \bar{r}^2 d\bar{r}. \quad (7.33)$$

Уравнение (7.33) является основным для вычисления характеристики моментов. Им можно пользоваться при переменных значениях  $e$  вдоль  $r$ , если предположить, что элементарные струи не влияют друг на друга, что практически допустимо при плавных изменениях  $e$ .

Для ветряка с постоянным  $e$  по радиусу можно вынести  $e$  за знак интеграла

$$\bar{M} = 8 \frac{e}{1+e} \int_{\bar{r}_0}^{\bar{R}} \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \bar{r}^2 d\bar{r}. \quad (7.34)$$

Этот интеграл можно решить, если пренебречь кручением струи, которое у быстроходных ветряков незначительно.

Следовательно, можно принять  $u_1 = 0$  и относительное число модулей  $z_u$  выразить так

$$z_u = \frac{\omega r + u_1}{V - v_1} \cong \frac{\omega r}{V - v_1} = \frac{\omega r}{V(1-e)} = \frac{z}{1-e}. \quad (7.35)$$

Для конца лопасти имеем

$$Z_u \cong \frac{\omega R}{V - v_1}. \quad (7.36)$$

Разделив уравнение (7.35) на (7.36), получим

$$\frac{r}{R} \cong \frac{z_u}{Z_u}; \quad (7.37)$$

$$\frac{dr}{R} \cong \frac{dz_u}{Z_u}. \quad (7.38)$$

Сделав ряд преобразований уравнения (7.34) и пренебрегая малыми вели-

чинами  $\mu^2$  и  $\frac{z_{u0}^3}{Z_u^3}$ , получим

$$\bar{M} = \frac{4e}{(1+e)Z_u} \left[ (1+\mu) \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} \right) \right]. \quad (7.39)$$

Подставляя значение  $z_u$  из уравнения (7.35), получим

$$\bar{M} = \frac{4e}{Z} \frac{1-e}{1+e} \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right]. \quad (7.40)$$

Мощность, развиваемая ветряком, равна  $M\omega$ , а так как из уравнения (7.33) момент равен

$$M = \bar{M} \pi R^3 \frac{\rho V^2}{2}, \quad (7.33a)$$

то мощность, развиваемую ветряком, можно написать так

$$T = M\omega = \bar{M} \pi R^3 \rho \frac{V^2}{2} \omega, \quad (7.41)$$

Подставив сюда  $Z = \frac{\omega R}{V}$ , вместо  $\omega = \frac{ZV}{R}$ , получим

$$T = \bar{M} \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} Z. \quad (7.42)$$

Заменив  $\bar{M}$  его значением из уравнения (7.40), получим:

$$T = 4e \frac{1-e}{1+e} \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right] \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2}. \quad (7.43)$$

Разделив мощность ветряка на секундную энергию потока, получим **коэффициент использования энергии ветра**

$$\xi = \frac{T}{\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2}} = 4e \frac{1-e}{1+e} \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right]. \quad (7.44)$$

Так как

$$4e \frac{1-e}{1+e} = \xi_i \text{ и } \xi = \xi_i \eta$$

то

$$\eta = \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right) - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right). \quad (7.45)$$

При выводе этого уравнения не были приняты во внимание потери, происходящие вследствие образования вихрей, сходящих с концов лопастей, а также принято кручение уходящей струи равным нулю, что допустимо у быстродвижущихся ветряков.

Следовательно, коэффициент использования энергии ветра, подсчитанный по формуле (7.44), будет значительно выше возможного к получению в практике.

#### 7.4. Потери ветряных двигателей

Потери ветряных двигателей разделяются на четыре группы: концевые потери; профильные потери; потери на кручение струи за ветряком; потери, происходящие вследствие неполного использования всей ометаемой площади.

**Концевые потери** происходят за счёт образования вихрей, сходящих с концов лопастей. Эти потери определяются на основании теории индуктивного сопротивления. Часть этих потерь учитывается при выводе идеального коэффициента использования энергии ветра  $\xi_i$ . Неучтенная часть концевых потерь выражается формулой

$$\bar{T}_j \cong \frac{e}{1-e} \left[ \frac{8\sqrt{1 + \left(\frac{1-e}{Z}\right)^2}}{(1+e)iZ} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{iZ}{\pi\left(1 - \frac{e}{2}\right)}\right)^2}} \right]. \quad (7.46)$$

**Профильные потери** вызываются трением струй воздуха о поверхность крыла и зависят только от профиля лопастей.

Мощность, поглощаемая профильным сопротивлением элементарных лопастей длиной  $dr$ , на радиусе  $r$  ветряка равна

$$dT_p = iC_p b dr \rho \frac{W^2}{2} W, \quad (7.47)$$

где  $C_p$  – коэффициент профильного сопротивления, который для крыла бесконечного размаха равен коэффициенту лобового сопротивления  $C_x$ , т.е.

$C_p = C_x = \mu C_y$ , здесь  $\mu = \frac{C_x}{C_y}$  – обратное качество крыла.

Подставляя значение  $W = (V - v_1)\sqrt{1 + Z_u^2}$ ,  $r = z \frac{V}{\omega}$  и  $z_u \cong \frac{z}{1-e}$  в уравнение (7.47) и проведя ряд преобразований, получим:

$$dT_p \cong 4\pi\rho \frac{V^5}{\omega^2} \frac{e(1-e)^2}{1+e} \mu \left[ 1 + \frac{z^2}{(1-e)^2} \right] dz.$$

Интегрируя в пределах от 0 до  $Z$  получим:

$$T_p \cong 4\pi\rho \frac{V^5}{\omega^2} \frac{e(1-e)^2}{1+e} \int_0^Z \mu \left[ 1 + \frac{z^2}{(1-e)^2} \right] dz.$$

Профильные потери там, где уже кончилась лопасть, существуют в виде сопротивления маха, которое, таким образом, учитывается приблизительно. В результате интегрирования получаем профильные потери всего ветряка

$$T_p \cong \pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \frac{4e(1-e)^3}{1+e} \frac{V^2}{\omega^2 R^2} 2\mu' \left[ Z + \frac{Z^3}{3(1-e)^2} \right].$$

где  $\mu' = \frac{C_x}{C_y}$  есть средняя величина по всей лопасти.

Так как  $\frac{4e(1-e)}{1+e} = \xi_i$  и  $\frac{V}{\omega R} = \frac{1}{Z}$ , то, подставляя значения этих выражений в данное уравнение и разделив его на  $\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \xi_i$ , получим окончательную формулу профильных потерь в безразмерном значении

$$\bar{T}_p \cong \frac{T_p}{\pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \xi_i} = 2\mu' \left[ \frac{1-e}{Z} + \frac{Z}{3(1-e)} \right]. \quad (7.48)$$

**Потери на кручение струи** за ветряком равны живой силе тангенциальных скоростей уходящей струи. Величину этих потерь получим, проинтегрировав живую силу от тангенциальных скоростей всех элементарных струй в пределах от  $r_0$  до  $R$ , а именно

$$T_m = \int_{r_0}^R (2\pi r dr \rho V) \frac{u_2^2}{2}. \quad (7.49)$$

Заменив в данном выражении  $u_2$  его значением, которое равно  $2u_1$ , и проведя ряд преобразований, получим

$$u_2 = \frac{V}{2Z} \frac{R}{r} \xi_i \eta, \quad (7.50)$$

где  $\eta = \frac{1 - \mu z_u}{1 + \frac{\mu}{z_u}}$  – относительный коэффициент полезного действия ветряка;



$z_u \cong \frac{z}{1-e}$  – число относительных модулей.

Подставляя значение  $u_2$  в уравнение (7.49), получим

$$T_m = \int_{r_0}^R \pi r dr \rho V^3 \frac{R^2}{r^2} \frac{\xi_i^2 \eta^2}{4Z^2}.$$

Вынося постоянные за знак интеграла и заменив  $\eta$  некоторым его значением  $\eta_1$ , средним для всего радиуса  $r$ , получим

$$T_m = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \frac{\xi_i^2 \eta_1^2}{2Z^2} \int_{r_0}^R \frac{dr}{r} = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \frac{\xi_i^2 \eta_1^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0}.$$

Поделив обе части этого равенства на мощность идеального ветряка

$$T_i = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \xi_i,$$

получим отвлечённую величину потерь на кручение струи за ветряком

$$\bar{T}_m = \frac{\xi_i \eta_1^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (7.51)$$

**Потери, происходящие вследствие неполного использования всей ометаемой площади, учитываются отношением**

$$\left( \frac{r_0}{R} \right)^2.$$

Полезную мощность, развиваемую ветряком, получим, вычтя все потери из мощности идеального ветряка

$$T = T_i \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - T_j - T_p - T_m.$$

Разделив на  $T_i$  получим

$$\frac{T}{T_i} = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \frac{T_j}{T_i} - \frac{T_p}{T_i} - \frac{T_m}{T_i},$$

откуда

$$T = T_i \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{R} \right)^2 - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m \right]. \quad (7.52)$$

Разделив правую и левую части этого уравнения на выражение энергии ветра  $\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2}$ , получим коэффициент использования энергии ветра реального ветряка

$$\xi = \xi_i \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{R} \right)^2 - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m \right]. \quad (7.53)$$

Так как,  $\xi = \xi_i \eta$ , находим, что относительный коэффициент полезного действия  $\eta$  ветряка равен

$$\eta = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m. \quad (7.54)$$

### Вопросы к главе 7

1. Теория реального ветряка. Первое уравнение связи.
2. Работа элементарных лопастей ветроколеса.
3. Теория реального ветряка. Второе уравнение связи.
4. Момент и мощность реального ветряка.
5. Потери ветряных двигателей.

## 8. Тепловой режим земной коры. Источники геотермального тепла

### 8.1. Тепловой режим земной коры

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.

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. На любой глубине температура горных пород приближенно может быть определена по формуле

$$T = t_g + \frac{(H + h)}{\sigma}, \quad (8.1)$$

где  $t_g$  – средняя температура воздуха данной местности;

$H$  – глубина, для которой определяется температура;

$h$  – глубина слоя постоянных годовых температур;

$\sigma$  – геотермическая ступень.

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

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.

В настоящее время получены данные о довольно глубоком промерзании верхней зоны земной коры. Геотермические наблюдения в зоне вечной мерзлоты позволили установить, что мощность мерзлых горных пород достигает 1,5 тыс. м. Так, в районе реки Мархи (приток Вилюя) на глубине 1,8 тыс. м температура составляет всего лишь 3,6 °С. Здесь геотермическая ступень составляет 500 м на 1 °С. На отдельных платформенных частях территории (на Русской платформе) температура с глубиной 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.

## 8.2. Подземные термальные воды (гидротермы)

В земной коре существует подвижный и чрезвычайно теплоемкий энергоноситель – вода, которая играет важную роль в тепловом балансе верхних геосфер. Вода насыщает все породы осадочного чехла. Она содержится в породах гранитной и осадочной оболочек, и, вероятно, в верхних частях мантии. Жидкая вода существует только до глубин 10–15 км, ниже при температуре около 700 °С вода находится исключительно в газообразном состоянии. На глубине 50–60 км при давлениях около  $3 \cdot 10^4$  атм исчезает граница фазовости, т.е. водяной газ приобретает такую же плотность, что и жидкая вода.

В любой точке земной поверхности, на определенной глубине, зависящей от геотермических особенностей района, залегают пласты горных пород, содержащие термальные воды – **гидротермы**. В связи с этим в земной коре следует выделять еще одну зону, условно называемую «гидротермальной оболочкой». Она прослеживается повсеместно по всему земному шару только на разной глубине. В районах современного вулканизма гидротермальная оболочка иногда выходит на поверхность. Здесь можно обнаружить не только горячие источники, кипящие грифоны и гейзеры, но и парогазовые струи с температурой 180–200° С и выше.

Температура подземных вод колеблется в широких пределах, обуславливая их состояние, влияя на состав и свойства. В зависимости от температуры на устье скважины, химического и газового состава геотермальные воды классифицируются:

- а) по температуре,  $t'_T$ , °С (слаботермальные  $t'_T \leq 40$ ; термальные  $40 < t'_T \leq 60$ ; высокотермальные  $60 < t'_T \leq 100$ ; перегретые  $t'_T > 100$ );
- б) по минерализации,  $C$ , г/л (ультрапресные  $C \leq 0,1$ ; пресные  $0,1 < C \leq 1,0$ ; слабосолоноватые  $1,0 < C \leq 3,0$ ; сильносоленоватые  $3,0 < C \leq 10,0$ ; соленые  $10,0 < C \leq 35,0$ ; рассольные  $C > 35,0$ );
- в) по общей жесткости,  $Ж_0$ , мг-экв/л (очень мягкие  $Ж_0 \leq 1,2$ ; мягкие  $1,2 < Ж_0 \leq 2,8$ ; средние  $2,8 < Ж_0 \leq 5,7$ ; жесткие  $5,7 < Ж_0 \leq 11,7$ ; очень жесткие  $Ж_0 > 11,7$ );
- г) по кислотности,  $pH$  (сильнокислые  $pH \leq 3,5$ ; кислые  $3,5 < pH \leq 5,5$ ; слабокислые  $5,5 < pH \leq 6,8$ ; нейтральные  $6,8 < pH \leq 7,2$ ; слабощелочные  $7,2 < pH \leq 8,5$ ; щелочные  $pH > 8,5$ );
- д) по газовому составу (сероводородные; сероводородно-углекислые; углекислые; азотно-углекислые; метановые; азотно-метановые; азотные);
- е) по газонасыщенности,  $\Gamma$ , мг/л (слабая  $\Gamma \leq 100$ ; средняя  $100 < \Gamma \leq 1000$ ; высокая  $\Gamma > 1000$ ).

Жидкая фаза воды и тепло могут происходить из одного источника лишь в том случае, если таковым является остывающий магматический расплав. Перегретая вода в виде паровых струй выделяется из расплава вместе с газами и легколетучими компонентами, устремляясь в верхние, более холодные горизонты. Уже при температурах 425–375 °С пар может конденсироваться в жидкую воду; в ней растворяется большинство летучих компонентов – так появля-

ется гидротермальный раствор **ювенильного** (первозданного) типа. Под ювенильными геологи подразумевают воды, которые никогда прежде не участвовали в водообороте. Такие гидротермы в прямом смысле слова являются первичными, новообразованными. Полагают, что подобным образом сформировалась вся поверхностная гидросфера морей и океанов в эпоху молодой магматической активности планеты, когда только-только зарождались твердые консолидированные «острова» материковых платформ.

Прямой противоположностью ювенильных вод являются воды **инфильтрационного** происхождения. Если ювенильные воды, отделяясь от магматического расплава, поднимаются к поверхности, то преобладающее движение инфильтрационных вод – от поверхности вглубь. Источник вод этого типа представляет собой атмосферные осадки или вообще поверхностные водотоки. По поровому пространству пород или трещинным зонам эти воды проникают (инфильтруются) в более глубокие горизонты. По пути движения они насыщаются различными солями, растворяют подземные газы, нагреваются, отбирая тепло у водопроводящих пород.

В зависимости от глубины проникновения инфильтрационных вод они становятся более или менее нагретыми. При средних геотермических условиях для того, чтобы инфильтрационные воды стали термальными (т.е. с температурой более 37 °С), необходимо их погружение на глубину 800–1000 м.

Инфильтрационные гидротермы способны изливаться на поверхность в виде горячих источников, если существует возможность разгрузки воды на поверхность по разломам, выклиниваниям слоев, что происходит в более низких относительно области питания участках. Причем, чтобы вода оставалась термальной, подъем ее к поверхности должен происходить очень быстро, например, по широким трещинам разломов. При медленном подъеме гидротермы остывают, отдавая аккумулированное тепло вмещающим породам. Однако, если пробурить скважину на глубину 3–4 тыс. м и обеспечить быстрый подъем воды, можно получить термальный раствор с температурой до 100 °С. Все это касается областей со средними геотермическими показателями и не относится к вулканическим районам или зонам недавнего горнообразования.

**Вулканический** тип термальных вод следует выделить особо. Как уже говорилось, горячие источники вулканических районов нельзя целиком считать «ювенильными», т. е. магматическими. Опыт исследований показывает, что в подавляющем случае вода вулканических терм имеет поверхностное инфильтрационное происхождение. Помимо гейзеров вулканический тип гидротерм включает грязевые грифоны и котлы, паровые струи и газовые фумаролы.

Все перечисленные типы термальных вод имеют 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

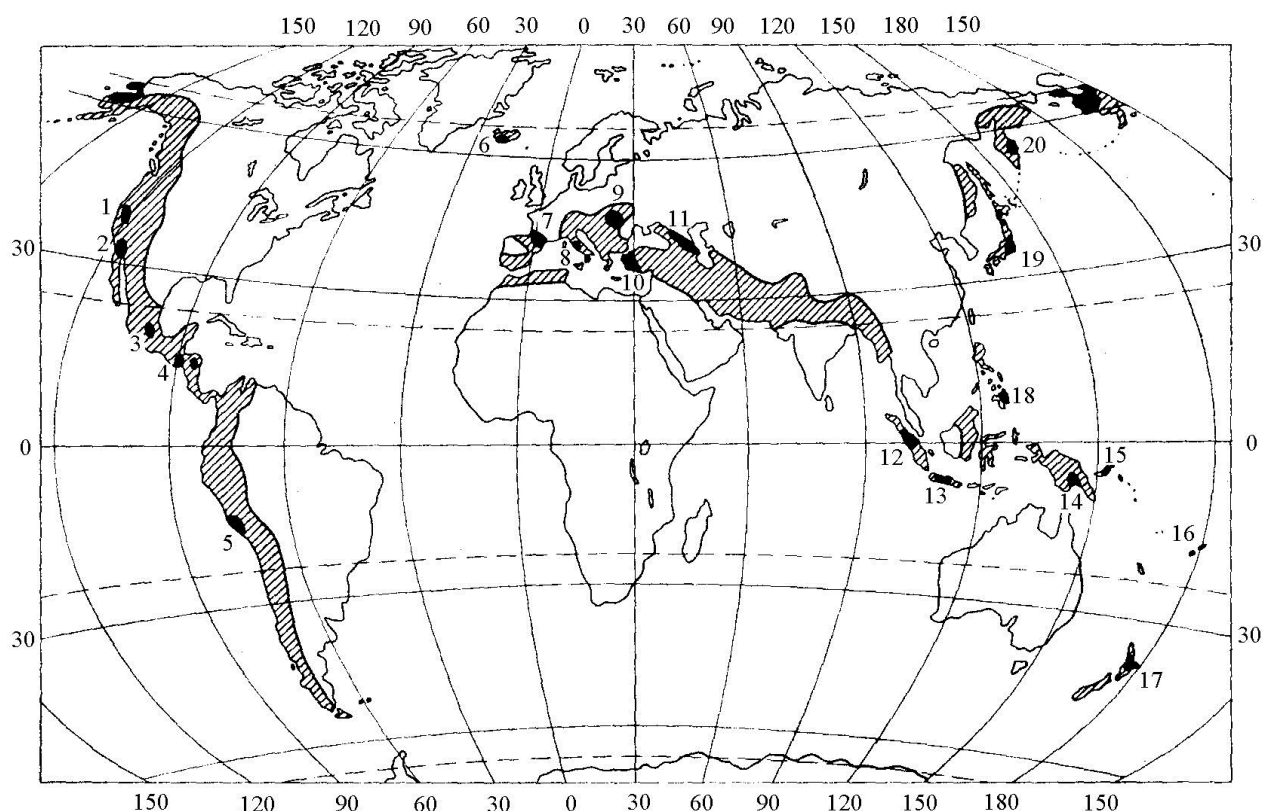
бальнеологических целях, рассолы – как промышленное сырье.

### 8.3. Запасы и распространение термальных вод

К областям распространения месторождений термальных вод относятся: вулканическое кольцо бассейна Тихого океана, Альпийский складчатый пояс, рифтовые долины континентов, срединно-океанические хребты, платформенные погружения и предгорные краевые прогибы (рис. 8.1).

По своему происхождению месторождения термальных вод можно подразделить на два типа, различающиеся способом переноса тепловой энергии.

**Первый тип** образуют геотермальные системы **конвекционного происхождения**, отличающиеся высокой температурой вод, разгружающихся на дневную поверхность. Это районы расположения современных или недавно потухших вулканов, где на поверхность выходят не только горячие воды, но и пароводяная смесь с температурой до 200 °С и более. На сегодняшний день все геотермальные электростанции работают в районах современного вулканизма.



**Рис. 8.1. Области производства геотермальной энергии в системе третичных орогенических поясов (заштриховано):**

- 1 – Калифорния; 2 – Серро Прието; 3 – Мексика, Идальго; 4 – Сан-Сальвадор; 5 – Чили, Атакама; 6 – Исландия; 7 – Араак-Лак; 8 – Лардерелло, Монте-Амиата; 9 – Венгерский бассейн; 10 – Айдин-Денизли; 11 – Кавказ; 12 – Суматра; 13 – Ява; 14 – Новая Гвинея; 15 – Новая Британия; 16 – Фиджи, Новые Гебриды; 17 – Вайракей, Вайотапу; 18 – Филиппины; 19 – Япония; 20 – Камчатка

К месторождениям конвекционного типа относятся также гидротермальные проявления так называемых рифтовых зон, характеризующихся активным тектоническим режимом и умеренно повышенными геотермическими градиен-

тами – 45–70 °С/км. (Рифтовые зоны и связанные с ними термоаномалии, как правило, простираются на огромные расстояния. Например, Северо-Мексиканский бассейн термальных вод протянулся на 1,5 тыс. км, от северо-восточной части Мексики до Флориды. Одна из скважин здесь с глубины 5 859 м дает пароводяную смесь с температурой 273 °С, причем этот флюид выходит при высоком давлении.)

**Второй тип** геотермальных месторождений образуется при преобладающем **кондуктивном прогреве** подземных вод, сосредоточенных в глубоких платформенных впадинах и предгорных прогибах. Они располагаются в невулканических районах и характеризуются нормальным геотермическим градиентом – 30–33 °С/км.

Бурением на нефть и газ, а частично и на воду обнаружены сотни подземных артезианских бассейнов термальных вод, занимающих площади в несколько миллионов квадратных километров. Как правило, артезианские бассейны, расположенные в равнинных областях и предгорных прогибах, содержат воду с температурой 100–150 °С на глубине 3–4 км.

Можно без преувеличения сказать, что любой отмеченный на карте предгорный прогиб, который был сформирован в эпоху альпийского горообразования, содержит бассейн термальных вод. Таковы артезианские бассейны предгорных прогибов Пиренеев, Альп, Карпат, Крыма, Кавказа, Копет-Дага, Тянь-Шаня, Памира, Гималаев. Термальные воды этих бассейнов демонстрируют уникальное многообразие химических типов от пресных (питьевых) до рассольных, употребляющихся как минеральное сырье для извлечения ценных элементов. Больше половины всех известных минеральных (лечебных) вод выходят в виде источников или выводятся скважинами в пределах альпийских предгорных и межгорных прогибов. Опыт показывает, что термальные воды подобных малых бассейнов являются наиболее перспективными для комплексного использования в практических целях.

Подсчеты запасов термальных вод основываются на имеющихся данных об объемах гравитационных вод, заключенных в пластах, объемах самих водоносных горизонтов и коллекторских свойствах слагающих их горных пород. Запасы термальных вод представляют собой общее количество выявленных термальных вод, находящихся в порах и трещинах водоносных горизонтов, имеющих температуру 40–200 °С, минерализацию до 35 г/л и глубину залегания до 3,5 тыс. м от дневной поверхности.

С развитием глубокого бурения на 10–15 км открываются многообещающие перспективы вскрытия высокотемпературных источников тепла. На таких глубинах в некоторых районах страны (исключая вулканические) температура вод может достигнуть 350 °С и выше.

Районы выхода на поверхность кристаллического фундамента (Балтийский, Украинский, Анабарский щиты) и приподнятые горные сооружения (Урал, Кавказ, Карпаты и т. д.) совершенно не имеют запасов термальных вод. На участках погружения фундамента, т. е. при увеличении толщины осадочного чехла, в недрах наблюдается некоторое «потепление» до 35–40 °С на платформах и до 100–120 °С в глубоких предгорных впадинах.

К числу районов, имеющих максимально «теплые» земные недра, несо-

менно, относится Курило-Камчатская вулканическая зона. Здесь нагретость пород и содержащихся в них вод зависит не только от глубины их залегания, но в большей степени от близости к вулканическим центрам и разломам в земной коре.

Таким образом, температура пород, а следовательно, и вод находится в зависимости от глубины залегания и от района, который характеризуется большей или меньшей геотермической активностью.

## **8.4. Состояние геотермальной энергетики в России**

### **Верхне-Мутновская ГеоТЭС**

Верхне-Мутновская ГеоТЭС мощностью 12 МВт (3х4 МВт) является опытно-промышленной очередью Мутновской ГеоТЭС проектной мощностью 200 МВт, создаваемой для электроснабжения Петропавловск-Камчатского промышленного района.

В настоящее время на площадке имеются три эксплуатационные скважины, суммарный дебит пара из которых превышает потребность трех устанавливаемых энергомодулей по 4 МВт с паровыми турбинами. Кроме того, эти энергомодули не полностью используют тепло отсепарированной термальной воды, закачиваемой в пласт с температурой 150 °С. В проекте последующих очередей Мутновской ГеоТЭС также не предусматривается использование тепла термальной воды, поэтому с применением только паровых турбин общая мощность ГеоТЭС на Мутновском месторождении не превысит 200 МВт.

Предлагается в течение трех лет разработать и испытать на ВерхнеМутновской ГеоТЭС пилотный двухконтурный аммиачный энергомодуль мощностью 6 МВт, работающий на избыточном паре из существующих скважин и тепле сбросной геотермальной воды, которая будет дополнительно охлаждаться до 100 °С.

Создание и испытания пилотного образца аммиачного энергомодуля позволит (наряду с наращиванием мощности Верхне-Мутновской станции до 18 МВт) на 40–50 % увеличить мощность Мутновской ГеоТЭС при тех же объемах бурения путем совместного применения паровых и аммиачных энергоустановок. При этом себестоимость электроэнергии снижается на 20–30 % за счет более эффективного использования геотермального тепла.

**Комбинированные ГеоТЭС** – будущее геотермальной энергетики Камчатки

Два крупнейших месторождения парогидротерм Камчатки – разрабатываемое Мутновское и перспективное Нижне-Кошелевское, способные на многие десятилетия полностью обеспечить энергетические потребности региона, расположены в горных местностях с неблагоприятным климатом. Среднегодовая температура отрицательная, глубина снега до 10 м. Это существенно затрудняет и удорожает строительство и эксплуатацию геотермальных электростанций.

Как известно, поступающая из геотермальных скважин пароводяная смесь имеет сложный химсостав. Содержание солей в водной фазе до 2 г/л, в том числе много кремнекислоты, в паре значительное количество неконденсирующихся газов, включая сероводород. Это ограничивает возможность глубо-



кого использования теплового потенциала геотермального теплоносителя в традиционном цикле ГеоТЭС с конденсационными паровыми турбинами, не позволяя получать дополнительный пар расширением воды и глубокий вакуум в конденсаторе. Сильный ветер, мороз, обильные снегопады в сочетании с высокой влажностью создают угрозу образования льда в обычно применяемых на ГеоТЭС влажных градирнях, что может привести к останову энергоблоков и даже к разрушению градирен.

На предлагаемых ГеоТЭС комбинированного цикла эти проблемы в значительной степени решаются. Если применить паровые турбины с близким к атмосферному противодавлением и направить отработанный пар в конденсатор, являющийся одновременно парогенератором нижнего контура станции с турбинами на низкокипящем незамерзающем рабочем теле, то суммарную выработку электроэнергии можно значительно повысить за счет снижения температуры отвода тепла из цикла. Конденсация пара низкокипящего рабочего тела осуществляется в воздушном конденсаторе, поэтому полезная мощность станции зимой значительно возрастает вместе с ростом потребности в электроэнергии. Кроме того, нет затрат пара на эжекторы для удаления неконденсирующихся газов, можно также частично использовать тепло геотермальной воды для перегрева пара низкокипящего рабочего тела. Облегчается зимняя эксплуатация станции, так как нет открытого контакта воды с воздухом (станция «сухая»), а температура воды в теплообменных аппаратах и трубопроводах не опускается ниже 60 °С.

Комбинированные ГеоТЭС уже работают за рубежом, но в районах с тропическим климатом, где их эффективность не может проявиться в полную силу из-за высоких температур воздуха. Для северных районов вышеуказанные преимущества таких станций обеспечивают большие перспективы их применения. В проходящем сейчас международном тендере на строительство первой очереди Мутновской ГеоТЭС станция комбинированного цикла рассматривается в качестве одного из возможных вариантов.

### **Океанская ГеоТЭС.**

В настоящее время электроснабжение г.Курильска и поселков Рейдово и Горячие Ключи осуществляется с помощью ДЭС, а теплоснабжение – с помощью угольных котельных. Дизтопливо ввозится в короткий период навигации – на о. Итуруп нет своего топлива. На закупку топлива расходовалось 16,3 млн руб. в ценах 1988 г. В последние годы из-за финансовых трудностей завоз топлива на остров резко сократился; электроэнергия подается населению по 2–3 часа в сутки.

Вместе с тем на острове имеются богатейшие по масштабам острова запасы высокопотенциальных геотермальных источников энергии, которые к тому же в основном уже разведаны. На гидрогеологическую разведку и НИОКР по созданию ГеоТЭС израсходовано около 75–80 млрд руб. в текущих ценах. В Государственной комиссии РФ утверждены запасы парогидротерм на мощность 15 МВт(э). Утверждено ТЭО строительства Океанской ГеоТЭС с мощностью первой очереди 12 МВт и на полное развитие 30 МВт – приказ Минтопэнерго РФ от 10.08.94 г. № 168. Стоимость электроэнергии на ГеоТЭС в два с лишним раза ниже чем на ДЭС. Привозное топливо будет вытеснено из расчета 2,5–

3 тыс. туг./год·МВт. Улучшится экологическая обстановка на острове.

### **Паужетская ГеоТЭС.**

На Паужетской ГеоТЭС мощностью 11 МВт используется на паровых турбинах только отсепарированный геотермальный пар из пароводяной смеси, получаемой из геотермальных скважин. Большое количество геотермальной воды (около 80 % общего расхода ПВС) с температурой 120 °С сбрасывается в нерестовую реку Озерная, что приводит не только к потерям теплового потенциала геотермального теплоносителя, но и существенно ухудшает экологическое состояние реки.

Предлагается использовать тепло сбросной геотермальной воды для выработки электроэнергии путем создания двухконтурной энергоустановки на низкокипящем рабочем теле. В качестве рабочего тела целесообразно взять изопентан или изобутан, проект подобной модульной энергоустановки разработан для Ставропольской ГеоТЭС. Расход сбросной воды на действующей Паужетской ГеоТЭС достаточен для энергоустановки мощностью 2 МВт, стоимость оборудования 1 000 \$/кВт. Температура сбросной воды снижается до 55 °С, тем самым значительно уменьшается тепловое загрязнение реки.

## **Вопросы к главе 8**

1. Тепловой режим земной коры.
2. Подземные термальные воды (гидротермы).
3. Запасы и распространение термальных вод.
4. Состояние геотермальной энергетики в России.
5. Перспективы использования геотермальной энергии, достоинства и недостатки.

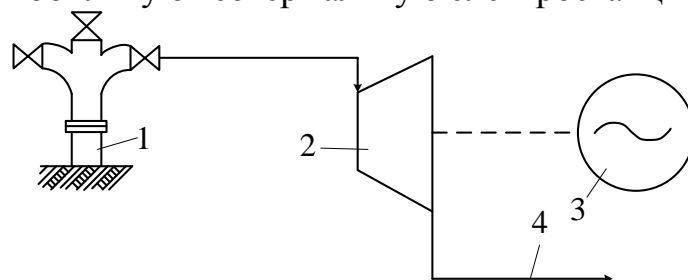
## 9. Использование геотермальной энергии для выработки тепловой и электрической энергии

### 9.1. Прямое использование геотермальной энергии

Геотермальные станции в вулканических районах базируются на месторождениях пароводяной смеси, добываемой из природных подземных трещинных коллекторов с глубины 0,5–3 км. Пароводяная смесь в среднем имеет степень сухости 0,2–0,5 и энтальпию 1 500–2 500 кДж/кг. В среднем одна эксплуатационная скважина обеспечивает электрическую мощность 3–5 МВт, средняя стоимость бурения составляет 900 долл. за метр.

**Геотермальная электростанция с непосредственным использованием природного пара.** Самая простая и доступная геотермальная энергоустановка представляет собой паротурбинную установку с противодавлением.

Природный пар из скважины подается прямо в турбину с последующим выходом в атмосферу или в устройство, улавливающее ценные химические вещества. В турбину с противодавлением можно подавать вторичный пар или пар, получаемый из сепаратора. По этой схеме электростанция работает без конденсаторов, и отпадает необходимость в компрессоре для удаления из конденсаторов неконденсирующихся газов. Эта установка наиболее простая, капитальные и эксплуатационные затраты на нее минимальны. Она занимает небольшую площадь, почти не требует вспомогательного оборудования и ее легко приспособить как мобильную геотермальную электростанцию (рис. 9.1).



**Рис. 9.1. Схема геотермальной электростанции с непосредственным использованием природного пара:**

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

Турбогенераторные установки с противодавлением не препятствуют промышленному использованию химических веществ, содержащихся в природном теплоносителе. Так, например, в природном паре некоторых месторождений Италии содержится 150–700 мг/кг борной кислоты, и при помощи подобных установок можно добывать этот ценный продукт одновременно с выработкой электроэнергии.

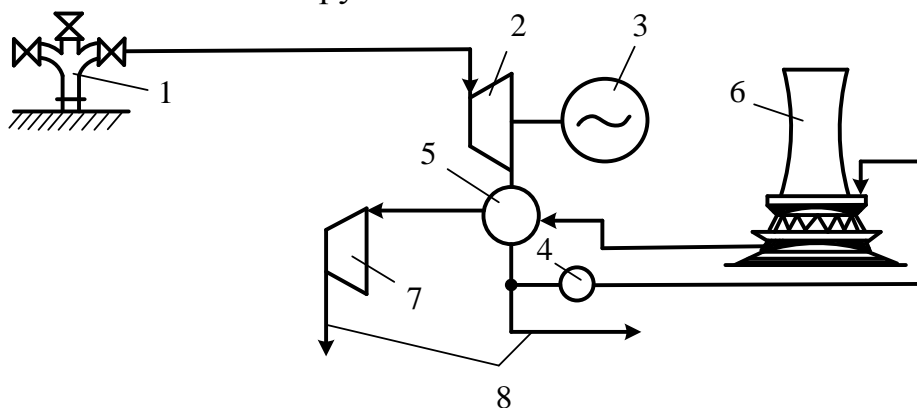
Рассмотренная схема может стать самой выгодной для тех районов, где имеются достаточные запасы природного пара. Рациональная эксплуатация обеспечивает возможность эффективной работы такой установки даже при переменном дебите скважин.

В подобных схемах требуется значительное количество пара, который с большим успехом может быть использован в турбинах конденсационного типа.

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

Пар из скважины 1 подается в турбину 2. Отработанный в турбине, он попадает в смешивающий конденсатор 5. Смесь охлаждающей воды и конденсата уже отработанного в турбине пара выпускается из конденсатора в подземный бак, откуда забирается циркуляционными насосами 4 и направляется для охлаждения в градирню 6. Из градирни охлаждающая вода опять попадает в конденсатор (рис. 9.2).

По такой схеме работает геотермальная электростанция Лардерелло-3, использующая природный пар, самая крупная в Италии. Она была спроектирована в начале второй мировой войны, но вступила в строй только в послевоенные годы. На электростанции установлено четыре турбогенератора мощностью по 26 тыс. кВт и два турбогенератора по 9 тыс. кВт. Последние предназначены для покрытия собственных нагрузок.



**Рис. 9.2. Схема геотермальной электростанции с конденсационной турбиной и прямым использованием природного пара:**

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

Ни один из установленных здесь турбогенераторов в течение многих лет не переводился в резерв. Коэффициент использования установленной мощности составляет 98%. Стабильная работа геотермальной электростанции Лардерелло-3 открыла путь к конструированию новых электростанций с использованием конденсационных турбин. По такой схеме с некоторыми изменениями работают многие геотермальные электростанции: Лардерелло-2 (Италия), Вайракей (Новая Зеландия) и др.

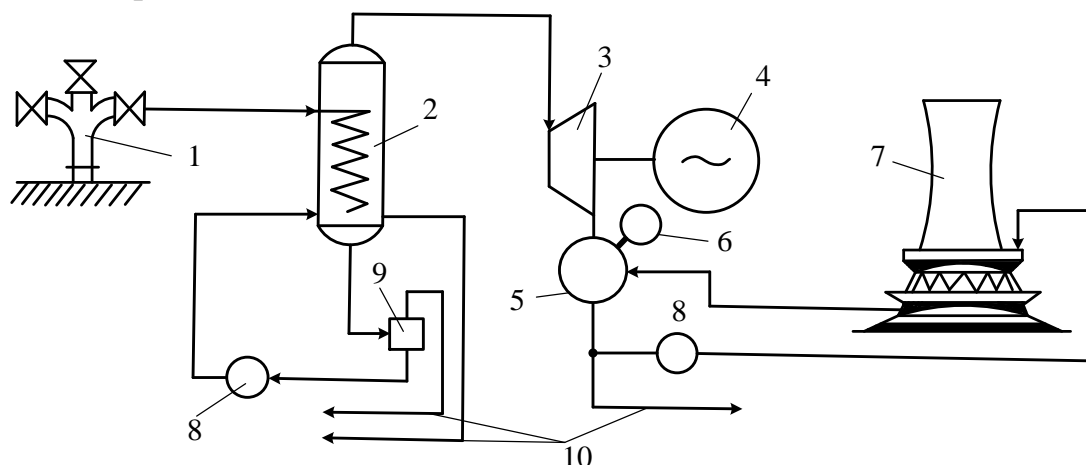
Благодаря техническим усовершенствованиям потребление пара на каждый киловатт мощности стало значительно меньше. Сейчас расход пара на новой электростанции Лаго (Италия) составляет уже 8 кг/кВт·ч.

## **9.2. Геотермальные электростанции с бинарным циклом**

Геотермальная электростанция с паропреобразователем. Конденсационная турбина с паропреобразователем работает на вторичном паре. Эти станции наиболее выгодны там, где природный пар имеет высокую температуру и

большое содержание газов. Схема электростанции следующая: природный пар из скважины поступает в паропреобразователь и свое тепло отдает вторичному теплоносителю, после чего чистый вторичный пар направляется в конденсационную турбину. Оработанный пар идет в конденсатор. Неконденсирующиеся газы, содержащиеся в природном паре, отделяются в паропреобразователе и выбрасываются либо в атмосферу, либо идут на химические заводы. Недостатком этой схемы является снижение параметров пара перед турбиной. По сравнению с электростанциями, непосредственно использующими природный пар, удельный расход пара здесь меньше на 30 %.

Геотермальная электростанция, работающая по этой схеме (рис. 9.1), позволяет полностью использовать все химические вещества, содержащиеся в природном паре.



**Рис. 9.3. Схема геотермальной электростанции с паропреобразователем:**  
1 – скважина; 2 – паропреобразователь; 3 – турбина; 4 – генератор; 5 – конденсатор;  
6 – вакуумный насос; 7 – градирня; 8 – насос; 9 – дегазатор; 10 – сброс

Опыт подтверждает, что стоимость строительства геотермальной электростанции с паропреобразователем немного больше стоимости электростанции с прямым использованием пара в конденсационной турбине. По схеме с паропреобразователем были построены электростанции Лардерелло-2 и Капельнуово (Италия). На станции Лардерелло-2 установлено 7 турбин мощностью по 11 тыс. кВт. Удельный расход пара на этой электростанции – 14 кг/кВт.

Геотермальные электростанции с конденсационной турбиной, работающие на отсепарированном паре, строятся там, где из скважины получают пар с большим содержанием воды. Пар или пароводяная смесь из скважины направляется в специальное устройство, расположенное на скважине. Под давлением в сепараторе происходит разделение пароводяной смеси на пар и воду. Отсепарированный пар по трубопроводу направляется в турбину и т. д.

Конденсационные турбины, работающие на отсепарированном паре, нашли применение в строительстве геотермальных электростанций в России (Паужетское месторождение на Камчатке), Исландии (месторождение Хвергерди) и в других странах.

Рассмотренная схема имеет свои преимущества. Полученный в сепараторе пар практически не содержит газов, что облегчает работу турбин.

### 9.3. Схема Паужетской ГеоТЭС

В настоящее время проведены геологические, геофизические, гидрогеологические и другие исследования тепло-аномальных районов Камчатки; обнаружены большие ресурсы термальных вод с высокой температурой.

Для получения электрической энергии за счет глубинного тепла Земли и строительства опытно-промышленной геотермальной станции гидрогеологической разведки сочли наилучшим районом долину реки Паужетки, расположенную на юге Камчатки, в 35 км от побережья Охотского моря.

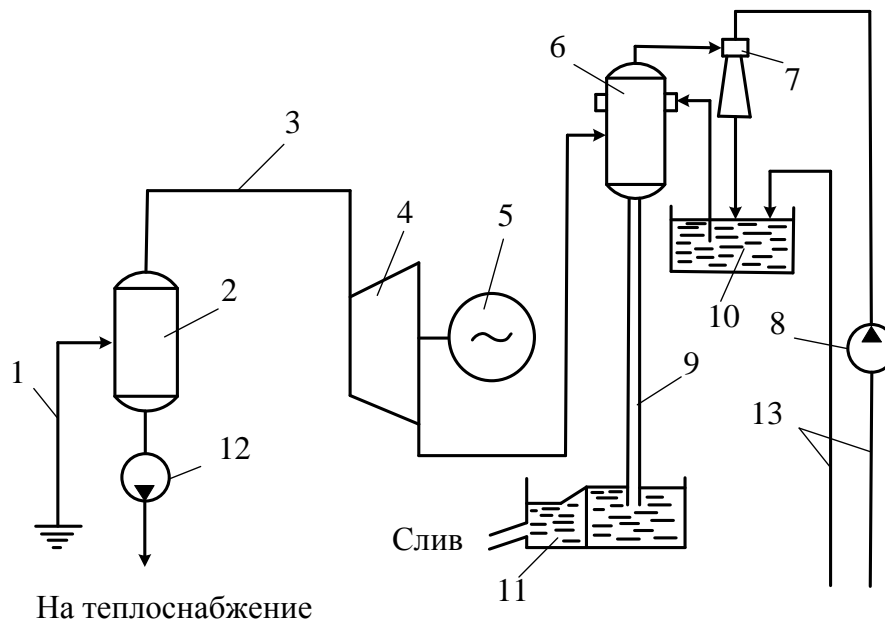
В 1957 г. началось бурение разведочных скважин. При бурении на термальные воды, особенно в зоне вулканических проявлений, применяли глинистый раствор и, непрерывно промывая, охлаждали ствол скважины, что предотвратило пароводяные выбросы. Всего была пробурена 21 скважина глубиной от 220 до 480 м. Каждая в среднем давала около 10 кг/сек пароводяной смеси с теплосодержанием 170 ккал/кг. Одна из них с глубины 250 м вскрыла температуру 195 °С, другая с глубины 375 м – 200 °С.

По химическому составу Паужетские гидротермы принадлежат к типу хлоридных натриевых вод. Общая минерализация их составляет 1,0–3,4 г/л, температура на выходе из скважин – 144–200 °С, давление на устье скважины – 2–4 атм, рН от 8,0 до 8,2. Термальные воды содержат повышенные количества кремнекислоты (250 мг/л) и борной кислоты (150 мг/л). Пар насыщен также газами: углекислым – 500 мг/кг, сероводородом – 25 мг/кг, аммиаком – до 15 мг/кг и др.

По предварительным данным, Паужетское геотермальное месторождение даст возможность получать 30–50 тыс. кВт электрической мощности. Схема опытно-промышленной станции, предложенная институтом Теплоэлектропроект, представлена на рис 9.4.

Пароводяная смесь из скважины поступает в сепаратор (емкостью 10 м<sup>3</sup>, с нагрузкой парового объема 600–800 м<sup>3</sup>/час), расположенный на скважине. Здесь при давлении 1,5 атм происходит разделение пара и воды. Отсепарированный пар по паропроводу поступает к турбинам. Горячая вода с температурой 100–110 °С сбрасывается в реку, и только небольшая часть ее идет по трубам для отопления и горячего водоснабжения жилых зданий поселка и электростанции. На станции установлены смешивающие конденсаторы. Поскольку конденсат отработавшего в турбинах пара здесь бесполезен, такие конденсаторы компактнее и требуют меньше охлаждающей воды. Для удаления газов из конденсаторов установлены водоструйные эжекторы с расходом воды 800–900 м<sup>3</sup>/час.

На ней установлены две турбины типа «МК-2,5» производства Калужского турбинного завода мощностью по 2,5 тыс. кВт каждая. Станция дает ток Озерновскому поселку, рыбокомбинату и близлежащим населенным пунктам.



**Рис. 9.4. Схема Паужетской опытно-промышленной геотермальной электростанции:**

- 1 – скважина; 2 – сепаратор; 3 – паропровод; 4 – турбина; 5 – генератор;  
 6 – смешивающий конденсатор; 7 – водоструйный эжектор; 8 – эжекторный насос;  
 9 – барометрическая труба; 10 – бак охлаждающей воды; 11 – сливной колодец;  
 12 – насос горячей воды; 13 – трубопровод холодной воды

## Вопросы к главе 9

1. Виды геотермальных источников энергии.
2. Классификация геотермальных районов.
3. Прямое использование геотермальной энергии.
4. Геотермальные электростанции с бинарным циклом.
5. Схема Паужетской ГеоТЭС.

## **10. Использование геотермальной энергии для теплоснабжения жилых и производственных зданий**

### **10.1. Основы построения схем и выбора оборудования геотермальных систем теплоснабжения**

Принципиальные схемы геотермальных систем теплоснабжения должны выбираться с учетом температуры и химического состава геотермального теплоносителя, характера возможного потребления геотермальной теплоты, условий сброса отработанной геотермальной воды, наличия источника питьевой воды, взаимного расположения термоводозабора, потребителя, места сброса и источника воды питьевого качества, а также расстояний между ними.

Оборудование геотермальных систем теплоснабжения должно выбираться с учетом данных по химическому и газовому составам геотермального теплоносителя, а также испытаний его на агрессивность и склонность к отложению солей.

На термоводозаборе, как правило, предусматривается сборная емкость геотермальной воды. Избыточное давление скважин обычно используется только для подачи геотермального теплоносителя в сборную емкость. Подача его потребителю должна производиться насосами. Объем сборной емкости принимается в размере не менее 1 часового дебита термоводозабора.

При эксплуатации термоводозабора в режиме обратной закачки принципиальная схема системы геотермального теплоснабжения должна обеспечивать возврат всего объема добытой геотермальной воды на насосную станцию обратной закачки после использования ее теплового потенциала. Температура и качество геотермальной воды, поступающей на насосную станцию обратной закачки после использования согласовывается с организацией, эксплуатирующей термоводозабор.

Сброс отработанных геотермальных вод в открытые водоемы после использования их теплового потенциала производится в соответствии с требованиями «Правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами».

При соответствии слаботермального и термального геотермального теплоносителя требованиям действующих норм на питьевую воду допускается создание однетрубных открытых систем горячего водоснабжения зданий и обеспечением отопления их от другого источника теплоты. Геотермальные системы теплоснабжения на базе месторождений высокотермальных и перегретых вод питьевого качества, как правило, представляют собой однетрубную открытую систему теплоснабжения с зависимым присоединением отопления. При использовании геотермальных теплоносителей непитьевого качества следует применять закрытые геотермальные системы теплоснабжения с зависимым или независимым присоединением систем отопления. При этом для размещения теплообменного оборудования системы теплоснабжения должны включать центральные геотермальные тепловые пункты (ЦТПГ).

ЦТПГ следует размещать таким образом, чтобы до минимума сократить протяженность трубопроводов, по которым циркулирует геотермальный теплоноситель.



При сбросе отработанной геотермальной воды близ термоводозабора или эксплуатации последнего методом обратной закачки ЦТПГ следует размещать в непосредственной близости от термоводозабора. При отсутствии обратной закачки и размещении места сброса отработанной геотермальной воды вблизи потребителя допускается размещать ЦТПГ в непосредственной близости от последнего. При этом транзитная (магистральная) тепловая сеть геотермального теплоносителя должна быть однотрубной, а распределительная тепловая сеть – четырехтрубной.

В геотермальных системах горячего водоснабжения допускается пониженная температура теплоносителя в точках водоразбора (но не ниже 45°C) при условии соответствия показателей этого теплоносителя нормам питьевой воды.

При повышенной коррозионной активности и склонности к солеотложениям геотермального теплоносителя следует применять коррозионно-стойкое оборудование, а также реагентные и другие методы обработки геотермальной воды, при согласовании с органами санитарного надзора.

Конструкции элементов геотермальных систем теплоснабжения должны исключать контакт геотермальной воды с атмосферным воздухом. Такой контакт допускается при обосновании с учетом возможного повышения при этом коррозионной агрессивности геотермальной воды.

Качество геотермального теплоносителя, поступающего на догрев в водогрейные котлы, должно соответствовать действующим нормам проектирования котельных установок. Догрев геотермального теплоносителя, не соответствующего указанным нормам должен производиться в теплообменных аппаратах. Для утилизации теплоты сбросной геотермальной воды в качестве пиковых источников теплоты допускается использовать теплонасосные установки.

## **10.2. Принципиальные схемы простейших систем геотермального теплоснабжения**

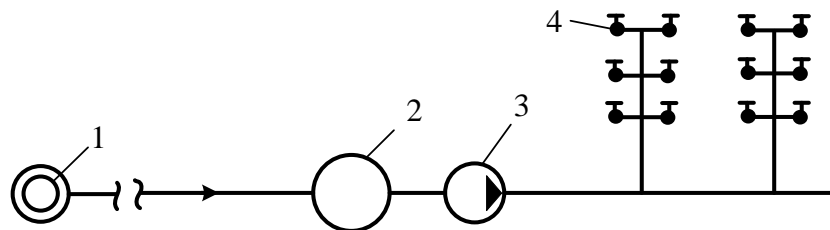
### ***10.2.1. Открытые системы геотермального теплоснабжения***

На рис. 10.1 приведена схема открытой системы теплоснабжения, обеспечивающие только горячее водоснабжение. В соответствии со схемой геотермальная вода по однотрубной тепловой сети подается непосредственно на водоразбор. Суточная неравномерность потребления горячей воды компенсируется с помощью бака-аккумулятора.

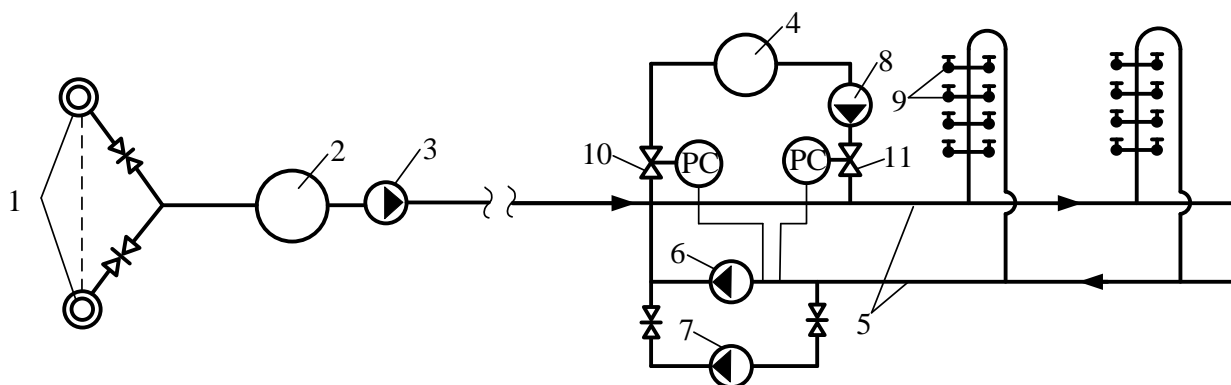
Недостатком схемы является отсутствие циркуляции теплоносителя в распределительной сети горячего водоснабжения, в результате чего неизбежно остывание теплоносителя в период отсутствия водоразбора горячей воды (например, ночью). По причине этого недостатка схема может быть рекомендована к применению только при малых расстояниях между термоводозабором и потребителем геотермальной теплоты.

Схема, представленная на рис. 10.2 отличается от схемы 10.1 наличием двухтрубной распределительной сети, в которой циркулирует геотермальная вода. Подпитка по мере водопотребления осуществляется из однотрубной транзитной тепловой сети. Суточная неравномерность водопотребления уравнива-

ется баком-аккумулятором. Схема может быть рекомендована при сравнительно большом удалении термоводозабора от потребителя геотермальной теплоты.



**Рис. 10.1 Открытая однотрубная геотермальная система горячего водоснабжения:**  
1 – геотермальная скважина; 2 – бак-аккумулятор; 3 – сетевой насос; 4 – водоразборный кран горячего водоснабжения



**Рис. 10.2. Открытая однотрубная геотермальная система горячего водоснабжения с двухтрубной распределительной сетью:**

1 – геотермальные скважины термоводозабора; 2 – сборный бак-аккумулятор геотермальной воды; 3 – сетевой насос; 4 – бак-аккумулятор распределительной сети; 5 – двухтрубная распределительная сеть; 6, 7, 8 – сетевой циркуляционный и подпиточный насосы распределительной сети; 9 – водоразборный кран; 10 – регулятор слива; 11 – регулятор подпитки

Приведенные схемы не могут быть применены при несоответствии геотермальной воды нормативным требованиям на воду питьевую и при ее температуре

$$t'_m < t'_{\text{н.в.}} + \delta t_{\text{тр}}, \quad (10.1)$$

где  $t'_m$  – температура термальной воды на устье скважин, °С;

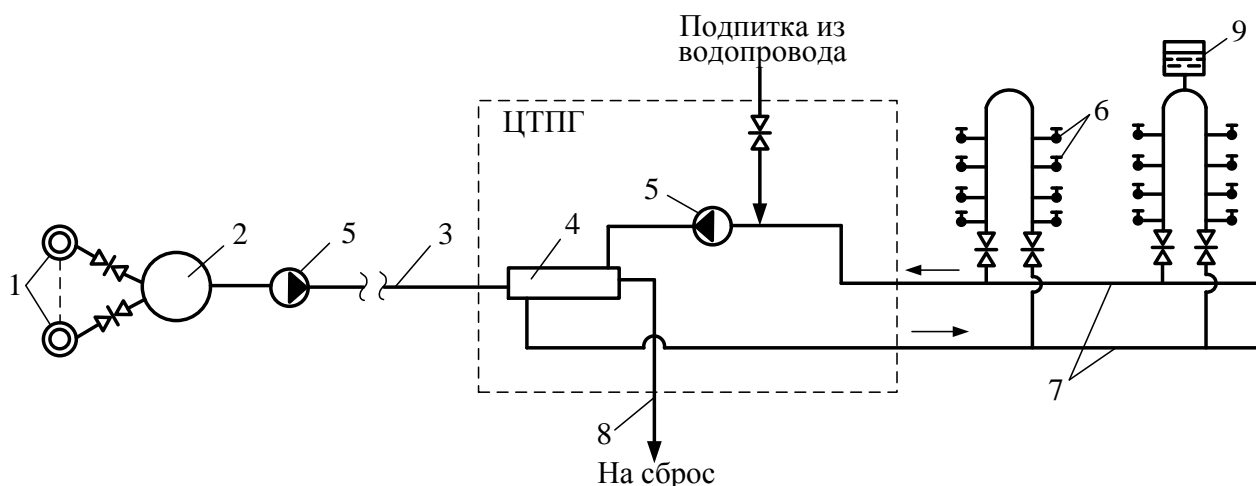
$\delta t_{\text{тр}}$  – снижение температуры воды за счет охлаждения при транспортировании, °С;

$t'_{\text{н.в.}}$  – нормируемая температура воды в системах горячего водоснабжения, °С.

### 10.2.2. Закрытые системы геотермального теплоснабжения

На рис. 10.3 представлена однотрубная закрытая геотермальная система горячего водоснабжения. Применение этой схемы целесообразно при расположении места сброса отработанной геотермальной воды вблизи потребителя геотермальной теплоты. В соответствии со схемой геотермальный теплоноситель

по однотрубной транзитной тепловой сети подается в теплообменник ЦТПГ (который расположен вблизи потребителя), после чего сбрасывается.



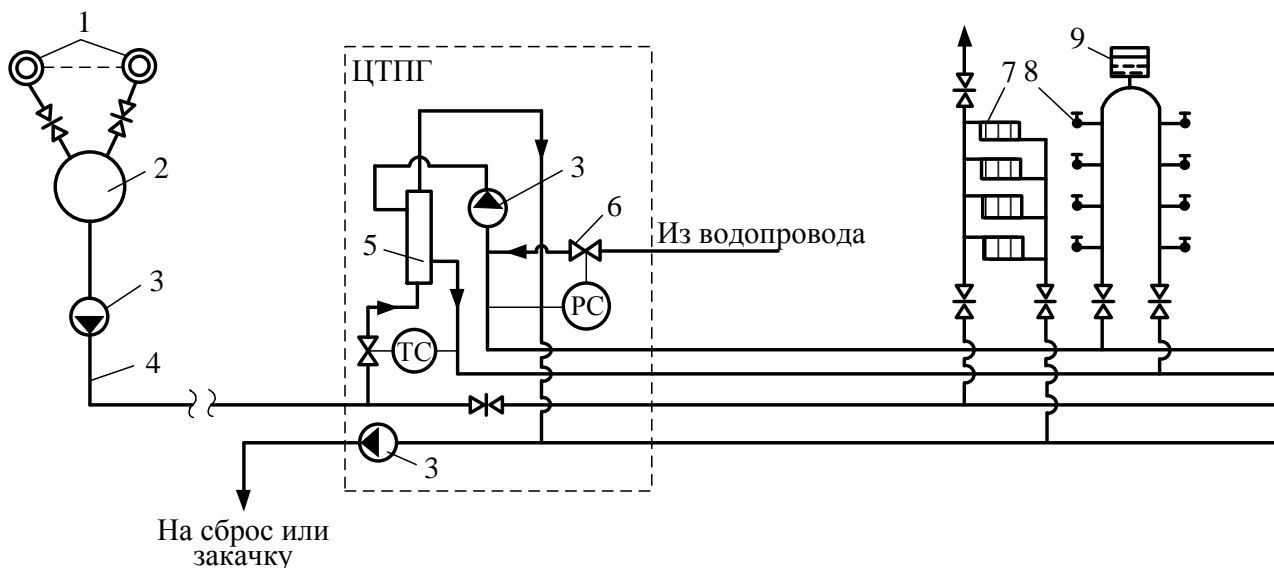
**Рис. 10.3. Однотрубная закрытая геотермальная система горячего водоснабжения:**

1 – геотермальные скважины термоводозабора; 2 – сборный бак-аккумулятор геотермальной воды; 3 – однотрубная транзитная теплотрасса; 4 – сетевой теплообменник; 5 – сетевые насосы; 6 – водоразборный кран; 7 – двухтрубная распределительная теплосеть; 8 – сбросная теплосеть; 9 – расширительный бак

Негеотермальный теплоноситель питьевого качества, циркулируя по двухтрубной распределительной сети, нагревается в теплообменнике ЦТПГ и подается на водоразбор. Подпитка осуществляется из водопровода. Ввиду сравнительно большой протяженности тепловой сети, по которой транспортируется геотермальная вода, схема может быть рекомендована при отсутствии опасности интенсивной коррозии и солеотложения.

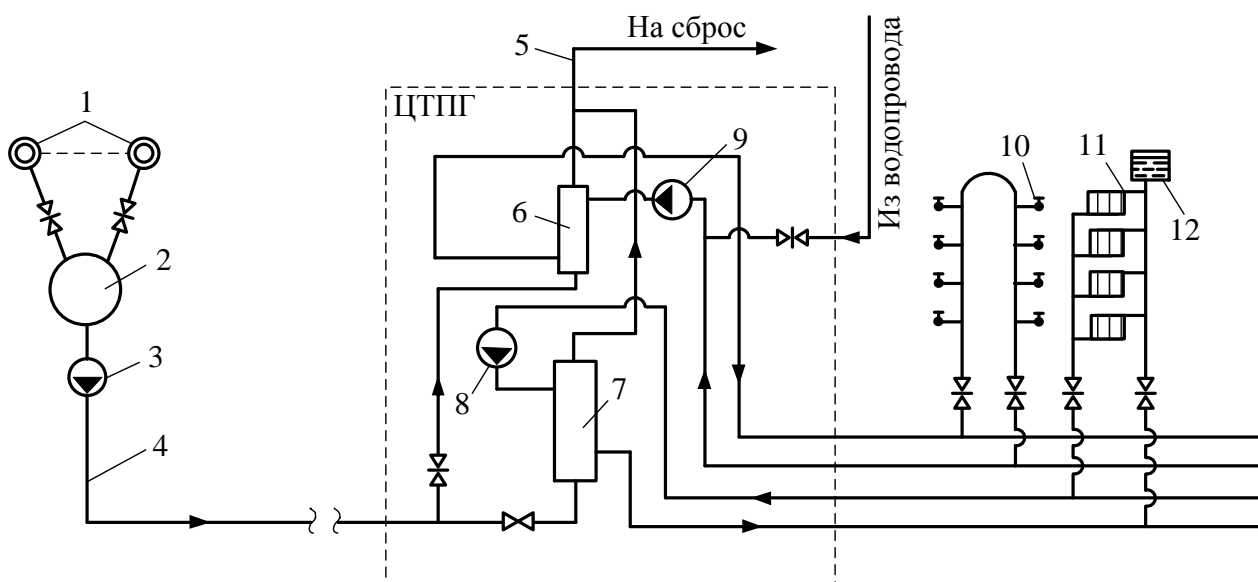
Расположение места сброса вблизи потребителя, а также отсутствие повышенной коррозионной активности и солеотложения делает возможным создание системы с однотрубной транзитной тепловой сетью для транспортирования геотермальной воды до ЦТПГ, расположенного рядом с потребителем. После ЦТПГ геотермальная вода сбрасывается. Распределительная сеть после ЦТПГ, в зависимости от качества и температуры геотермального теплоносителя, может быть четырехтрубной с зависимым присоединением отопления (рис. 10.4) либо четырехтрубной с независимым присоединением отопления (рис. 10.5).

При непитьевом качестве геотермального теплоносителя и отсутствии воды питьевого качества возможно применение систем теплоснабжения, обеспечивающих только отопление зданий и сооружений.



**Рис. 10.4. Закрытая однетрубная геотермальная система теплоснабжения с зависимым присоединением отопления (распределительная сеть четырехтрубная):**

1 – геотермальные скважины; 2 – сборный бак-аккумулятор геотермальной воды;  
3 – сетевой насос; 4 – однетрубная транзитная теплотрасса; 5 – теплообменник горячего водоснабжения; 6 – регулятор подпитки; 7 – отопительный прибор; 8 – водоразборный кран;  
9 – расширительный бак



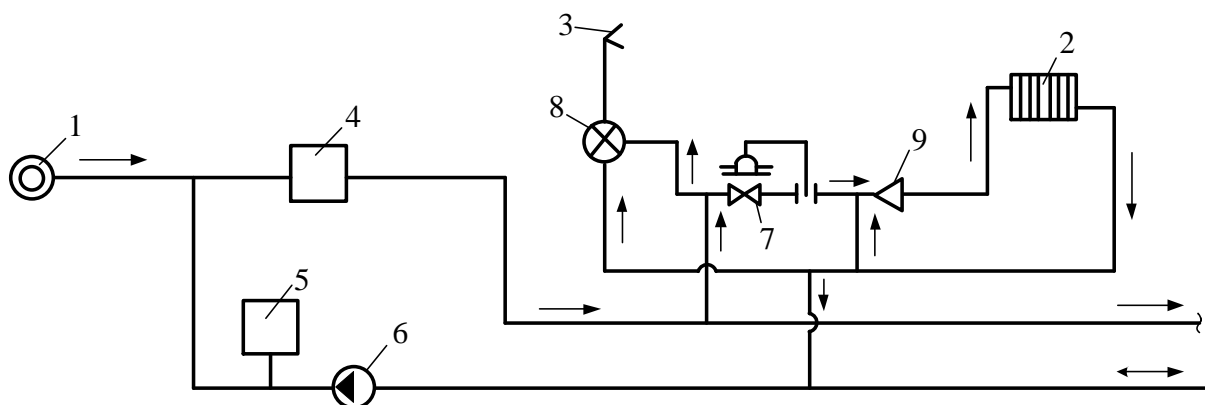
**Рис. 10.5. Закрытая геотермальная система теплоснабжения с независимым присоединением отопления:**

1 – геотермальные скважины; 2 – сборный бак-аккумулятор; 3 – сетевой насос геотермальной воды; 4 – транзитная однетрубная теплосеть; 5 – транзитная сбросная теплосеть; 6 – водоподогреватель горячего водоснабжения; 7 – отопительный теплообменник; 8 – сетевой насос распределительной сети отопления; 9 – сетевой насос горячего водоснабжения; 10 – водоразборный кран; 11 – отопительный прибор;  
12 – расширительный бак

### 10.3. Принципиальные схемы систем геотермального теплоснабжения с повышенной эффективностью

#### 10.3.1. Бессливная система геотермального теплоснабжения

При соответствии качества геотермального теплоносителя требованиям на питьевую воду может быть применена бессливная система геотермального теплоснабжения (рис. 10.3.1.1), обеспечивающая минимальный расход геотермальной воды на единицу расчетной отопительной нагрузки, равный среднечасовому расходу горячего водоснабжения. В этой системе при наименьшем удельном расходе воды (по сравнению со всеми другими схемами) имеют место наибольшая мощность пикового источника теплоты и наибольший расход топлива. Регулирование отопительной нагрузки системы производится путем постепенного сокращения доли пикового догрева, работающего большую часть отопительного сезона с последующим переходом на пропуски. Эффективность такой системы тем выше, чем больше доля горячего водоснабжения в суммарной тепловой нагрузке.



**Рис. 10.6. Принципиальная схема бессливной системы геотермального теплоснабжения:**

- 1 – скважина; 2 – система отопления; 3 – система горячего водоснабжения;  
4 – пиковая котельная; 5 – бак-аккумулятор; 6 – насос; 7 – регулятор постоянства расхода;  
8 – регулятор постоянства температуры; 9 – элеватор

Система работает следующим образом. Геотермальная вода по однетрубной магистрали от скважины 1 подается к пиковой котельной. Расход этой воды равен среднечасовому расходу на горячее водоснабжение  $G_{зв}$ , а в подающем трубопроводе двухтрубной распределительной сети среднечасовой расход составляет

$$G_{\partial з} = G_{зв} + G_{\partial о б}, \quad (10.2)$$

где  $G_{\partial о б}$  – добавочный расход теплоносителя, равный расходу в обратном трубопроводе распределительной сети и определяемый по формуле

$$G_{\partial о б} = \frac{Q'_{об} - G_{зв} c(t'_{mз} - 5)}{c(t'_{mз} - t'_o)}. \quad (10.3)$$

В пиковой котельной 4 суммарный расход воды  $G_{\partial з}$  догревается до  $t'_{mз}$

и подается в системы отопления 2 через регулятор постоянства расхода 7 и элеватор 9, а также в системы горячего водоснабжения 3. Суточная неравномерность потребления горячей воды уравнивается баком-аккумулятором 5, установленным на обратном трубопроводе распределительной сети, циркуляция в этой сети создается насосом 6.

Возможны три варианта соотношений между температурой геотермальной воды и нормируемой температурой теплоносителя в системах горячего водоснабжения.

1.  $t'_m < t'_{zg}$ . Вся отопительная нагрузка и часть нагрузки горячего водоснабжения при этом покрывается пиковой котельной. Доля нагрузки горячего водоснабжения  $\gamma_n$  покрываемая пиковой котельной в расчетном режиме, подсчитывается по формуле

$$\gamma_n = \frac{t'_{zg} - t'_m}{t'_{zg} - 5}. \quad (10.4)$$

Пиковая котельная работает круглый год.

2.  $t'_m = t'_{zg}$ . Пиковая котельная подбирается на расчетную отопительную нагрузку, т.е.  $Q'_{об}$  и работает в течение всего отопительного сезона.

3.  $t'_m > t'_{zg}$ . В этом случае пиковый догрев обеспечивает часть отопительной нагрузки. Работа пиковой котельной продолжается до тех пор, пока вносимое геотермальное водой количество теплоты не станет равным необходимой теплопроизводительности отопительной системы.

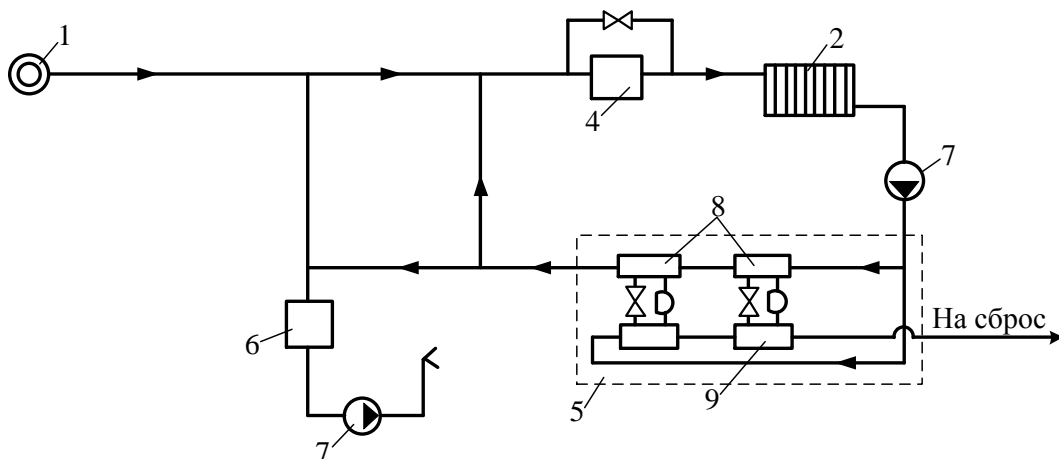
### ***10.3.2. Система геотермального теплоснабжения с тепловыми насосами***

При технико-экономическом обосновании экономии геотермальной теплоты рекомендуется геотермальная система теплоснабжения с применением теплонасосных установок (ТНУ). В летний период такая система может работать в режиме хладоснабжения. Теплонасосные установки следует размещать на обратной линии геотермальных систем. На рисунке 10.7 показана упрощенная схема с пиковой котельной и ТНУ.

### ***10.3.3. Комплексная система геотермального теплоснабжения***

Комплексные геотермальные системы теплоснабжения могут охватывать отопление и горячее водоснабжение гражданских и промышленных зданий, а также обеспечение технологических нужд производств (автомойки, прачечные и пр.).

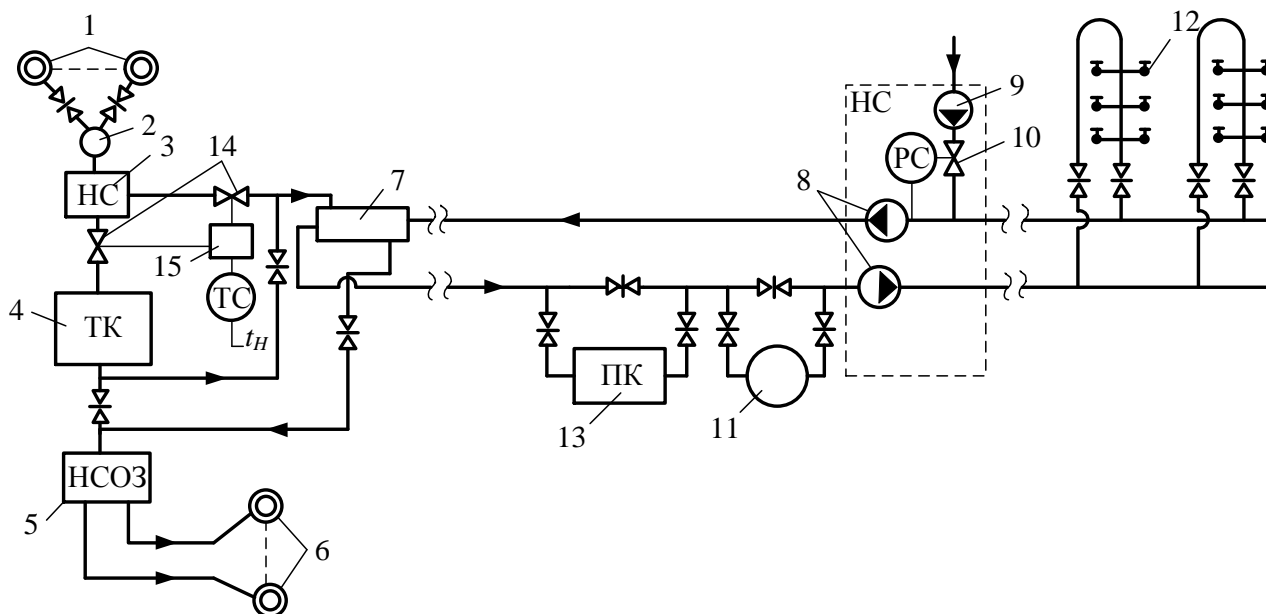
Принципиальные схемы комплексных систем геотермального теплоснабжения, обеспечивающих отопление теплиц и горячее водоснабжение других объектов (в том числе и на технологические нужды), изображены на рисунках 10.8 и 10.9.



**Рис. 10.7. Принципиальная схема системы геотермального теплоснабжения с применением пикового догрева и тепловых насосов:**

1 – скважина; 2 – система отопления; 3 – система горячего водоснабжения;  
4 – пиковая котельная; 5 – теплонасосная установка; 6 – бак-аккумулятор; 7 – насос;  
8 – конденсаторы; 9 – испарители

Наличие транзитного участка распределительных двухтрубных сетей связано с необходимостью расположения ЦТПГ на термоводозаборе ввиду обратной закачки (в другом случае это может быть место сброса). Системы различаются лишь видом пикового источника теплоты. В схеме на рисунке 10.8 таким источником служит пиковая котельная, работающая на органическом топливе и расположенная в населенном пункте вблизи потребителя ГВ. В схеме на рис. 10.9 эту функцию выполняет теплонасосная установка (ТНУ), расположенная на термоводозаборе.

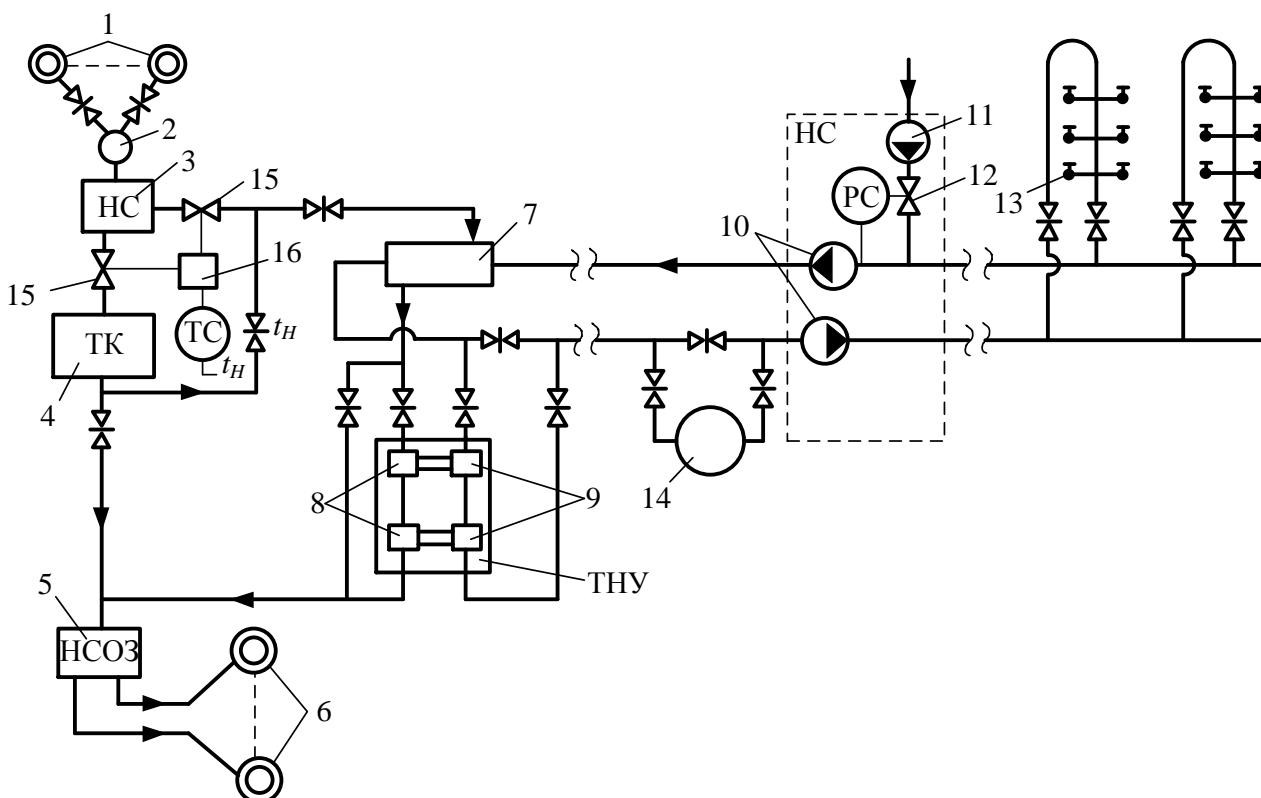


**Рис. 10.8. Комплексная двухтрубная геотермальная система теплоснабжения с пиковой котельной:**

1 – геотермальные скважины; 2 – промежуточная сборная емкость; 3 – насосная станция;  
4 – отопление тепличного комбината; 5 – насосная станция обратной закачки; 6 – скважины обратной закачки; 7 – сетевой теплообменник; 8 – сетевые насосы; 9 – подпиточный насос;  
10 – регулятор подпитки; 11 – сетевой бак-аккумулятор; 12 – водоразборный кран;  
13 – пиковая котельная; 14 – регулирующие задвижки; 15 – регулятор

Подобные системы могут быть применены в тех случаях, когда геотермальный теплоноситель не отличается повышенной коррозионной активностью, но его качество не соответствует требованиям, предъявляемым к питьевой воде. При этом источником питьевой воды служит водопровод населенного пункта. При других исходных условиях возможны и другие схемные решения подобных комплексных систем.

При расположении места сброса близ потребителей геотермальной теплоты ЦТПГ может быть расположен в населенном пункте. Однако такое его расположение удлиняет протяженность тепловой сети, по которой циркулирует геотермальный теплоноситель, что нежелательно из-за распространенной повышенной коррозионной активности геотермальной воды. Создание систем, аналогичных приведенным, возможно также при независимом присоединении системы отопления тепличного комбината.



**Рис. 10.9. Комплексная двухтрубная геотермальная система теплоснабжения с теплонасосной установкой:**

1 – геотермальные скважины; 2 – промежуточная емкость; 3 – насосная станция; 4 – отопление тепличного комбината; 5 – насосная станция обратной закачки; 6 – скважины обратной закачки; 7 – сетевой теплообменник; 8 – испарители ТНУ; 9 – конденсаторы ТНУ; 10 – сетевые насосы; 11 – подпиточный насос; 12 – регулятор подпитки; 13 – водоразборный кран; 14 – сетевой бак-аккумулятор; 15 – регулирующие задвижки; 16 – регулятор

Учитывая регулирование отопительной нагрузки тепличного комбината, в годовом цикле работы изображенных комплексных схем можно выделить три режима эксплуатации в зависимости от коэффициента отпуска теплоты на отопление:

- а) в летний период термоводозабор имеет постоянный дебит геотермальной воды, обеспечивающий тепловую нагрузку горячего водоснабжения;
- б) с наступлением отопительного периода до включения пикового догрева



дебит термоводозабора регулируется в зависимости от нагрузки отопления и полностью обеспечивает геотермальной теплотой потребности отопления и горячего водоснабжения;

- в) при низких температурах наружного воздуха дебит термоводозабора постоянен, равен максимальному и обеспечивает полностью потребность в теплоте отопления теплиц, в то время как на нужды горячего водоснабжения теплоты не хватает. Нехватка геотермальной теплоты на нужды горячего водоснабжения компенсируется пиковым догревом. Регулирование производится изменением тепловой мощности пикового источника теплоты.

## **Вопросы к главе 10**

1. Основы построения схем и выбора оборудования геотермальных систем теплоснабжения.
2. Принципиальные схемы простейших систем геотермального теплоснабжения. Открытые системы геотермального теплоснабжения.
3. Принципиальные схемы простейших систем геотермального теплоснабжения. Закрытые системы геотермального теплоснабжения.
4. Принципиальные схемы систем геотермального теплоснабжения с повышенной эффективностью. Бессливная система, система с тепловыми насосами.
5. Принципиальные схемы систем геотермального теплоснабжения с повышенной эффективностью. Комплексная система геотермального теплоснабжения .

## 11. Энергетические ресурсы океана

### 11.1. Баланс возобновляемой энергии океана

Основная доля энергии, поступающей в Мировой океан – результат поглощения им солнечного излучения. Энергия поступает в океан также в результате гравитационного взаимодействия космических тел и водных масс планеты, создающего приливы, и поступления тепла из глубины планеты. Поверхность Мирового океана занимает около 70 % поверхности всей планеты и составляет примерно 360 млн км<sup>2</sup>. Большая часть этой поверхности постоянно свободна ото льда и хорошо поглощает солнечное излучение. В океанской воде примерно 65 % солнечного излучения поглощается первым метром водной толщи и до 90 % – десятиметровым слоем. В дневное время в низких широтах вода прогревается примерно на 10 м и более за счет процессов теплопроводности и турбулентного перемешивания (твердая поверхность суши прогревается не более чем на 0,5 м).

Запасенное океаном тепло частично в виде длинноволнового излучения ( $\lambda > 10$  мкм) переизлучается, а частично передается в атмосферу теплопроводным пограничным слоем и вследствие испарения. Относительная роль этих процессов различна для разных районов планеты, но на широтах от 70° с.ш. до 70° ю.ш. характеризуется примерно одинаковыми значениями: длинноволновое излучение в атмосферу и космическое пространство 41 %; передача тепла атмосфере за счет теплопроводности 5 %; потери на испарение 54 %.

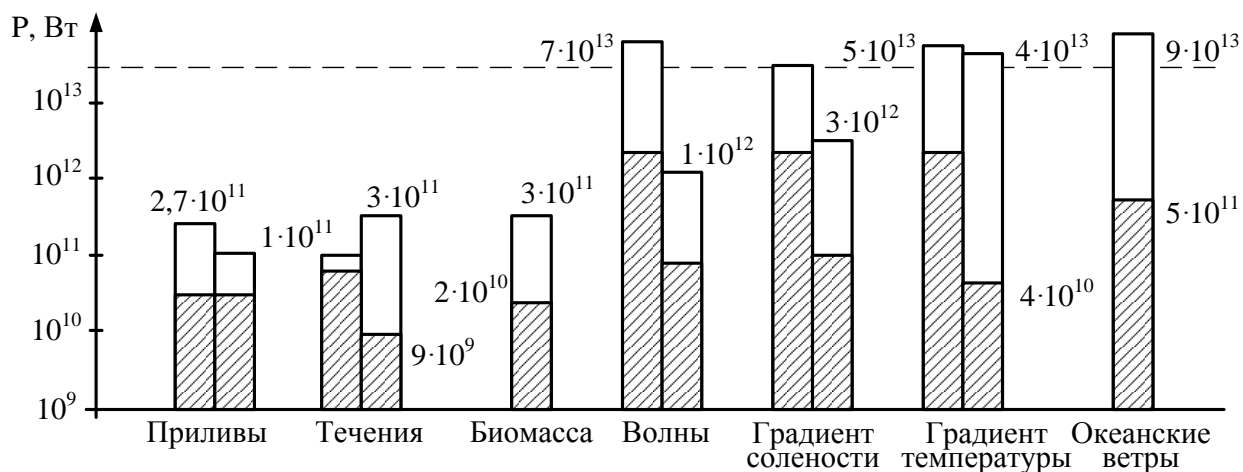
За счет движения воздушных и водных масс запасенная океаном энергия переносится по всей планете, причем в области между экватором и 70° с. ш. в среднем 40 % тепла переносится океанскими течениями, а на 20° с. ш. вклад океана в перенос энергии составляет до 74 %. Ежегодно с поверхности океана испаряется слой воды толщиной примерно 1 м (около  $340 \cdot 10^{12}$  т) и около  $36 \cdot 10^{12}$  т воды возвращается со стоком рек, ледников и т.п.

Примерно 2/3 суммарного солнечного излучения испытывают в океане и на поверхности суши различные изменения: преобразуются в тепло 43 %; расходуются на испарение, образование осадков 22 %; сообщение энергии рекам, ветру, волнам, различным видам течений в океане 0,2 %. Примерно 0,02 % всей энергии воспринятого солнечного излучения идет на образование продукции фотосинтеза и частично на образование ископаемого топлива.

Соизмерим с этой величиной суммарный поток энергии, поступающей из недр Земли и в виде приливной энергии. Выделить из указанных потоков те, что непосредственно имеют отношение только к океану, достаточно трудно. Для энергетики важны не абсолютные величины мощностей различных источников, а лишь та их часть, которую можно преобразовать в требуемые для хозяйственной деятельности виды энергии.

Сотрудниками океанографического института Скриппса (США) выполнены оценки суммарных и допустимых для переработки мощностей различных океанических источников энергии за пять лет – с 1977 по 1982 г. Соответствующие данные приведены на диаграммах рис. 11.1, на которых отмечены два уровня – суммарный и допускающий преобразование (заштрихован). Более

поздние оценки сделаны с учетом целого ряда технологических и экологических факторов. Они, как правило, в части допустимой к использованию энергии оказались ниже.



**Рис. 11.1. Распределение океанских источников энергии по мощности (правые столбцы – по оценкам 1977 г., левые – по оценкам 1982 г.)**

При оценке возможностей приливной энергетики учтено, что работать на полную мощность ПЭС могут только в течение 30 % времени. Данные по океанским течениям получены с учетом 1 % допустимого замедления скорости течения. При оценке возможностей энергетического использования продукции океанского фотосинтеза приняты во внимание 50 % эффективности преобразования бурых водорослей в метан и возможность размещения соответствующих ферм в 20 % районов естественного апвеллинга. **Апвеллинг** – подъем глубинных вод, богатых биогенными веществами, играющими роль удобрений. Для прибрежных волновых генераторов установлены КПД 50 % и время работы 40 % годового бюджета времени. КПД преобразования градиента солености принят равным 3%, а градиента температур – 5 %, причем в последнем случае считается реальным разместить преобразователи на 2 % поверхности океана в тропической зоне. Для ветровых станций коэффициент преобразования энергии ветра принят равным 60 %, и допустимым уровнем изъятия мощности считают 1 % мощности ветров, дующих на удалении от берега.

Немаловажны и такие «технологические» свойства океанских ресурсов энергии, как плотность энергии и стабильность источника энергии. Эти свойства определяют размеры будущих преобразователей, необходимые установленные мощности, режимы использования энергии.

## 11.2. Основы преобразования энергии волн

Огромные количества энергии можно получить от морских волн. Мощность, переносимая волнами на глубокой воде, пропорциональна квадрату их амплитуды и периоду. Поэтому наибольший интерес представляют длиннопериодные ( $T \approx 10$  с) волны большой амплитуды ( $a \approx 2$  м), позволяющие снимать с единицы длины гребня в среднем от 50 до 70 кВт/м.

Наибольшее число волновых энергетических устройств разрабатывается для извлечения энергии из волн на глубокой воде. Это наиболее общий тип

волн, существующий при условии, что средняя глубина моря  $D$  превышает величину половины длины волны  $\lambda/2$ .

Поверхностные волны на глубокой воде имеют следующие основные характерные особенности:

- волны являются неразрушающимися синусоидальными с нерегулярной длиной, фазой и направлением прихода;
- движение каждой частицы жидкости в волне является круговым (в то время как изменяющиеся очертания волн свидетельствуют о распространении волнового движения, сами по себе частицы не связаны с этим движением и не перемещаются в его направлении);
- амплитуда движения частиц жидкости экспоненциально уменьшается с глубиной.
- существенно, что амплитуда волны  $a$  не зависит от ее длины  $\lambda$ , скорости распространения  $c$ , периода  $T$ , а зависит лишь от характера предшествовавшего взаимодействия ветра с морской поверхностью.

В волнах на глубокой воде нет поступательного движения жидкости. В подповерхностном слое жидкости ее частицы совершают круговое движение с радиусом орбиты  $a$ , равным амплитуде волны (рис. 11.2). Высота волны  $H$  от вершины гребня до основания равна ее удвоенной амплитуде ( $H = 2a$ ). Угловая скорость движения частиц  $\omega$  измеряется в радианах в секунду. Изменение формы волновой поверхности таково, что наблюдается поступательное движение, хотя сама вода не перемещается в направлении распространения волны (слева направо). Это кажущееся перемещение есть результат наблюдения фаз смещения последовательно расположенных частиц жидкости; как только одна частица в гребне опускается, другая занимает ее место, обеспечивая сохранение формы гребня и распространение волнового движения вперед.

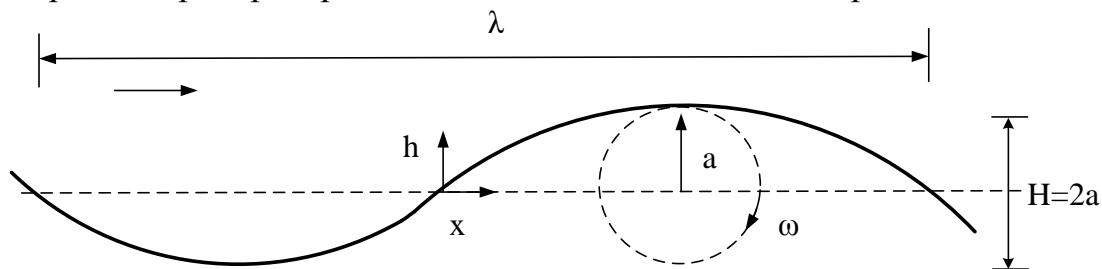


Рис. 11.2. Характеристики волны

Соотношение, устанавливающее зависимость между частотой и длиной для поверхностной волны на глубокой воде

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2}. \quad (11.1)$$

Период движения волны

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}}} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}. \quad (11.2)$$

Скорость частицы жидкости в гребне волны

$$v = a\omega = a\sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}}. \quad (11.3)$$

Скорость перемещения поверхности волны в направлении  $x$  определится как

$$c = \frac{\omega\lambda}{2\pi} = \frac{g}{\omega} = g\sqrt{\frac{\lambda}{2\pi g}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}. \quad (11.4)$$

Скорость  $c$  называют фазовой скоростью распространения волн, создаваемых на поверхности жидкости. Эта величина не зависит от амплитуды волны и неявным образом связана со скоростью движения частиц жидкости в волне.

Полная кинетическая энергия на единицу ширины волнового фронта и единицу длины вдоль направления распространения волны равна

$$E_k = \frac{\rho a^2 g}{4}. \quad (11.5)$$

Нормированная потенциальная энергия волны равна в точности такой же величине

$$E_p = \frac{\rho a^2 g}{4}. \quad (11.6)$$

Полная энергия на единицу площади поверхности волны равна сумме кинетической и потенциальной энергий.

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho a^2 g}{2}. \quad (11.7)$$

Выражение для энергии на единицу ширины волнового фронта и на единицу длины волны вдоль направления его распространения запишется в виде

$$E_\lambda = E\lambda = \frac{\rho a^2 g \lambda}{2}. \quad (11.8)$$

Подставим  $\lambda$  из (11.1)

$$E_\lambda = \frac{\pi \rho a^2 g^2}{\omega^2}, \quad (11.9)$$

что с учетом (11.2)

$$E_\lambda = \frac{\rho a^2 g^2 T^2}{4\pi}. \quad (11.10)$$

Выражение для мощности, переносимой в направлении распространения волны на единицу ширины волнового фронта, имеет вид

$$P' = \frac{\rho g a^2 c}{4} = \frac{\rho g a^2 \lambda}{4T}. \quad (11.11)$$

С учетом (11.7) и (11.11) мощность  $P'$  равна полной энергии (кинетическая + потенциальная)  $E$  в волне на единицу площади поверхности, умноженной на величину  $u = \frac{c}{2}$  – групповую скорость волн на глубокой воде, с которой волны переносят энергию. С учетом выражения для групповой скорости

$$P' = Eu = E \frac{c}{2}. \quad (11.12)$$

Различие между групповой и волновой (фазовой) скоростями является общим для любых волновых процессов, для которых фазовая скорость зависит от длины волны (дисперсия).

Подставляя в (11.11) фазовую скорость в виде (11.4), получаем соотношение

$$P' = \frac{\rho g^2 a^2 T}{8\pi}. \quad (11.13)$$

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

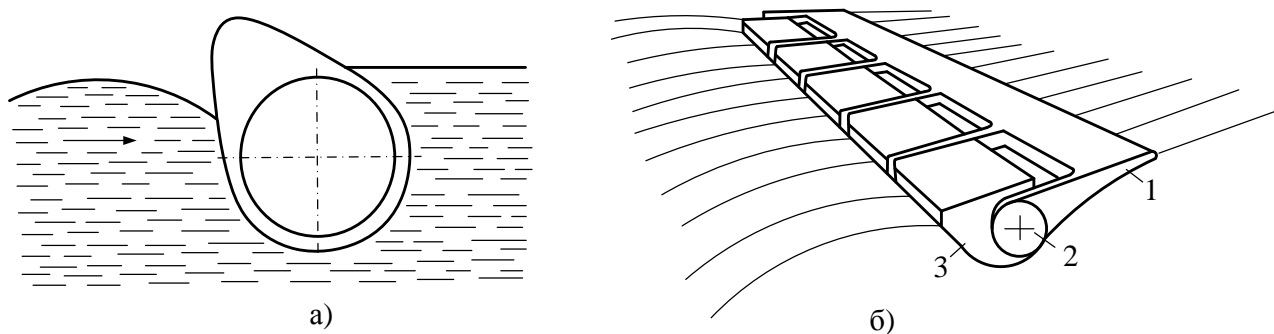
На практике волны оказываются совсем не такими идеализированно синусоидальными, как это подразумевалось выше. Обычно в море наблюдаются нерегулярные волны с переменными частотой, направлением и амплитудой. Поскольку результирующее волнение чаще всего нельзя представить суммой волн, действующих в одном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

### 11.3. Преобразователи энергии волн

#### 11.3.1. Преобразователи, отслеживающие профиль волны

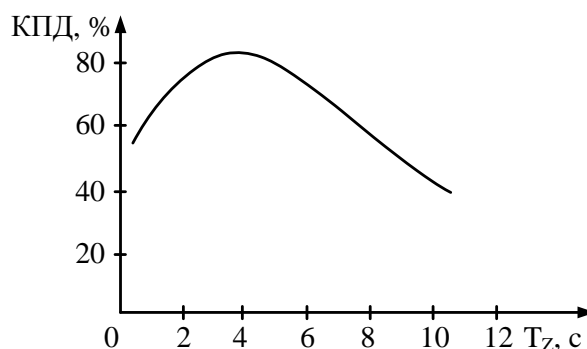
В этом классе преобразователей остановимся в первую очередь на разработке профессора Эдинбургского университета Стефана Солтера, названной в честь создателя «утка Солтера». Техническое название такого преобразователя – колеблющееся крыло. Форма преобразователя обеспечивает максимальное извлечение мощности (рис. 11.3).

Волны, поступающие слева, заставляют утку колебаться. Цилиндрическая форма противоположной поверхности обеспечивает отсутствие распространения волны направо при колебаниях утки вокруг оси. Мощность может быть снята с оси колебательной системы с таким расчетом, чтобы обеспечить минимум отражения энергии. Отражая и пропуская лишь незначительную часть энергии волн (примерно 5 %), это устройство обладает весьма высокой эффективностью преобразования в широком диапазоне частот возбуждающих колебаний (рис. 11.4).



**Рис. 11.3. «Утка Солтера»:**

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



**Рис. 11.4. Эффективность «утки Солтера» (диаметр 15 м, ось зафиксирована)**

Первоначально Солтером был создан макет достаточно узкополосного по частоте устройства. В волновом бассейне оно поглощало до 90 % падающей энергии. Первые испытания в условиях, близких к морским, были проведены в мае 1977 г. на оз. Лох-Несс. 50-метровая гирлянда из 20-метровых «уток» общей массой 16 т была спущена на воду и испытывалась в течение 4 месяцев при различных волновых условиях. В декабре того же года эта модель в 1/10 будущей величины океанского преобразователя была вновь спущена на воду и дала первый ток. В течение 3 мес. одного из самых суровых зимних периодов модель первой английской волновой электростанции работала с КПД около 50 %.

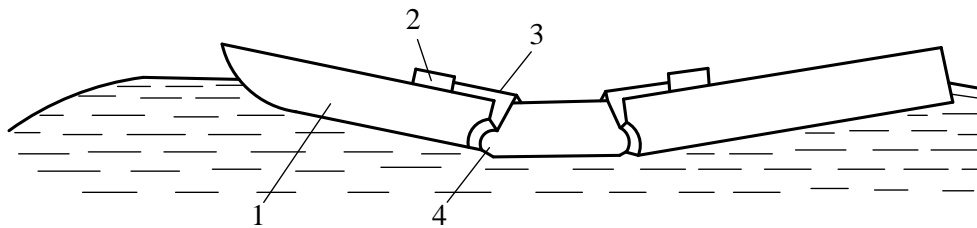
Дальнейшие разработки Солтера направлены на то, чтобы обеспечить утке способность противостоять ударам максимальных волн и создать заякоренную гирлянду преобразователей в виде достаточно гибкой линии. Предполагается, что характерный размер реальной утки будет равен примерно  $0,1\lambda$ , что для 100-метровых атлантических волн соответствует 10 м. Нить из уток протяженностью несколько километров предполагается установить в районе с наиболее интенсивным волнением западнее Гебридских островов. Мощность всей станции будет примерно 100 МВт.

Наиболее серьезными недостатками для «уток Солтера» оказались следующие:

- необходимость передачи медленного колебательного движения на привод генератора;
- необходимость снятия мощности с плавающего на значительной глубине

- устройства большой протяженности;
- вследствие высокой чувствительности системы к направлению волн необходимость отслеживать изменение их направления для получения высокого КПД преобразования;
- затруднения при сборке и монтаже из-за сложности формы поверхности «утки».

Другой вариант волнового преобразователя с качающимся элементом – контурный плот Коккерелла. Его модель также в 1/10 величины испытывалась в том же, что и «утка Солтера», году в проливе Солент вблизи г. Саутгемптона. Контурный плот – многозвенная система из шарнирно соединенных секций (рис. 11.3). Как и «утка», он устанавливается перпендикулярно к фронту волны и отслеживает ее профиль.



**Рис. 11.5. Вариант выполнения контурного плота Коккерелла:**

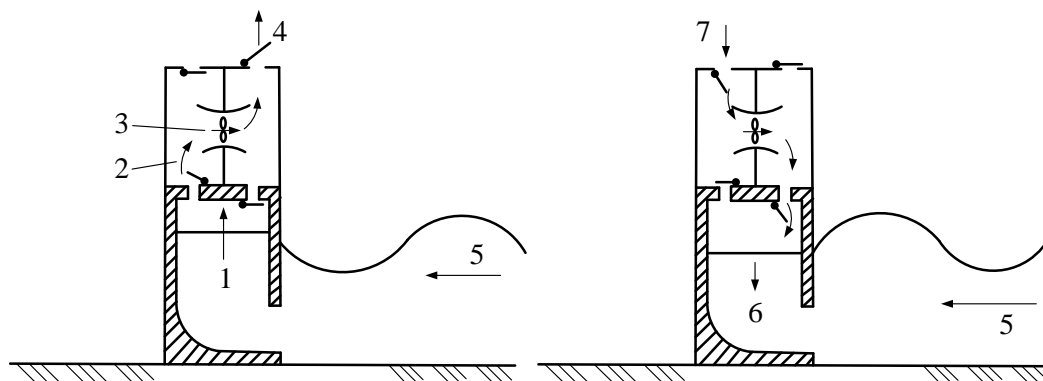
1 – колеблющаяся секция; 2 – преобразователь; 3 – тяга; 4 – шарнир

Детальные лабораторные испытания модели плота в масштабе 1/100 показали, что его эффективность составляет около 45 %. Это ниже, чем у «утки» Солтера (но плот привлекает другим достоинством: близость конструкции к традиционным судостроительным). Изготовление таких плотов не потребует создания новых промышленных предприятий и позволит поднять занятость в судостроительной промышленности.

### ***11.3.2. Преобразователи, использующие энергию колеблющегося водяного столба***

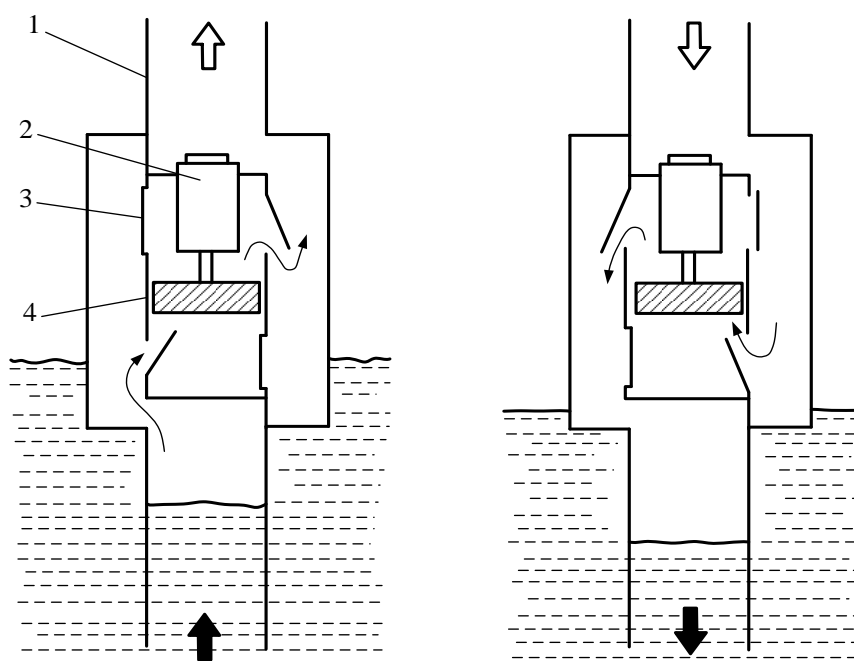
При набегании волны на частично погруженную полость, открытую под водой, столб жидкости в полости колеблется, вызывая изменения давления в газе над жидкостью. Полость может быть связана с атмосферой через турбину. Поток может регулироваться так, чтобы проходить через турбину в одном направлении, или может быть использована турбина Уэлса. Уже известны по крайней мере два примера коммерческого использования устройств на этом принципе – сигнальные буи, внедренные в Японии Масудой (рис. 11.6) и в Великобритании сотрудниками Королевского университета Белфаста. Более крупное и впервые включенное в энергосеть устройство построено в Тофтестоллене (Норвегия) фирмой Kvaerner Brug A/S. Основной принцип действия колеблющегося столба показан на рис. 11.7. В Тофтестоллене он используется в 500-киловаттной установке, построенной на краю отвесной скалы. Кроме того, национальная электрическая лаборатория (NEL) Великобритании предлагает конструкцию, устанавливаемую непосредственно на морском дне.





**Рис. 11.6. Схема установки, в которой используется принцип колеблющегося водного столба (разработана Национальной инженерной лабораторией NEL, Великобритании, размещается непосредственно на грунте, турбина приводится в действие потоком одного направления):**

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



**Рис. 11.7. Пневмобуй Масуды:**

1 – корпус; 2 – электрогенератор; 3 – клапан; 4 – воздушная турбина

Главное преимущество устройств на принципе водяного колеблющегося столба состоит в том, что скорость воздуха перед турбиной может быть значительно увеличена за счет уменьшения проходного сечения канала. Это позволяет сочетать медленное волновое движение с высокочастотным вращением турбины. Кроме того, здесь создается возможность удалить генерирующее устройство из зоны непосредственного воздействия соленой морской воды.

### 11.3.3. Подводные устройства

Преимущества подводных устройств состоят в том, что эти устройства позволяют избежать штормового воздействия на преобразователи. Однако при

их использовании увеличиваются трудности, связанные с извлечением энергии и обслуживанием.

Для примера можно рассмотреть преобразователь типа «бристольский цилиндр», относящийся к группе устройств, работающих под действием скоростного напора в волне. Наполненный воздухом плавучий корпус (цилиндр), имеющий среднюю плотность  $0,6-0,8 \text{ т/м}^3$ , закреплен под водой на опорах, установленных на грунте. Цилиндр колеблется в волне, совершая движение по эллиптической траектории и приводя в действие гидравлические насосы, вмонтированные в опоры и преобразующие энергию движения цилиндра. Перекачиваемая ими жидкость может подаваться по трубопроводам на генераторную станцию, единую для нескольких цилиндров.

Одно из преимуществ идеи «бристольского цилиндра» то, что после настройки на оптимальную частоту он не отражает энергию других частот, а дает ей возможность распространяться далее, где ее могут поглотить другие преобразователи, например цилиндры с другой частотой.

## Вопросы к главе 11

1. Баланс возобновляемой энергии океана .
2. Основы преобразования энергии волн.
3. Преобразователи энергии волн, отслеживающие профиль волны.
4. Преобразователи энергии волн, использующие энергию колеблющегося водяного столба.
5. Подводные устройства.

## 12. Использование энергии приливов и морских течений

### 12.1. Общие сведения об использовании энергии приливов

Приливные колебания уровня в огромных океанах планеты вполне предсказуемы. Основные периоды этих колебаний – суточные продолжительностью около 24 ч и полусуточные – около 12 ч 25 мин. Разность уровней между последовательными самым высоким и самым низким уровнями воды – высота прилива  $R$ . Диапазон изменения этой величины составляет 0,5–10 м. Первая цифра наиболее характерна, вторая достигается и даже превосходится лишь в некоторых особенных местах вблизи побережья континентов. Во время приливов и отливов перемещение водных масс образует приливные течения, скорость которых в прибрежных проливах и между островами может достигать примерно 5 м/с.

Поднятую на максимальную высоту во время прилива воду можно отделить от моря дамбой или плотиной в бассейне площадью  $A$ . Места с большими высотами приливов обладают большими потенциалами приливной энергии. Однако не только этот фактор важен для развития приливной энергетики: надо принимать во внимание и капитальные затраты, и будущую прибыль от создания соответствующих приливных электростанций (ПЭС).

Энергия приливных течений может быть преобразована подобно тому, как это делается с энергией ветра. Преобразование энергии приливов использовалось для приведения в действие сравнительно маломощных устройств еще в средневековой Англии и в Китае. Из современных ПЭС наиболее хорошо известны крупномасштабная электростанция Ранс мощностью 240 МВт, расположенная в эстуарии реки Ла Ранс, впадающей в залив Сен Мало (Бретань, Франция), и небольшая опытная станция мощностью 400 кВт в Кислой губе на побережье Баренцева моря (Россия). Из мест, которые давно привлекают внимание гидростроителей, следует назвать эстуарий реки Северн в Великобритании и залив Фанди на восточном побережье Северной Америки на границе между США и Канадой. Характеристики мест возможного строительства ПЭС в России приведены в таблице 12.1.

Таблица 12.1

Основные места концентрации приливной энергии в России

Масторасположение	Средняя высота прилива, м	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Потенциал	
			Средняя мощность, ГВт	Годовая выработка, ТВт·ч
Мезенский залив	6,0	2330,0	15,2	50,0
Пенжинская губа	6,2	20530,0	87,4	190,0
Тугурский залив	4,7	1800,0	10,3	27,6

Высота, ход и периодичность приливов в большинстве прибрежных районов хорошо описаны и проанализированы благодаря потребностям навигации и океанографии. Поведение приливов может быть предсказано достаточно точно, с погрешностью менее 4 %. Таким образом, приливная энергия оказывается весьма надежной формой возобновляемой энергии.

При ее преобразовании возникают и определенные неудобства:

- а) несовпадение основных периодов возникновения приливов (12 ч 25 мин и 24 ч 50 мин), связанных с движением Луны, с привычным для человека периодом солнечных суток (24 ч), в связи с чем оптимум приливной генерации находится не в фазе с потребностями в энергии;
- б) изменение высоты прилива и мощности приливного течения с периодом в две недели, что приводит к колебаниям выработки энергии;
- в) необходимость создания потоков воды с большим расходом при сравнительно малом перепаде высот, что заставляет использовать большое число турбин, работающих параллельно;
- г) очень высокие капитальные затраты на сооружение большинства предполагаемых ПЭС;
- д) потенциальные экологические нарушения и изменение режимов эстуариев и морских районов.

## 12.2. Мощность приливных течений и приливного подъема воды

Вблизи побережья и между островами приливы могут создавать достаточно сильные течения, пригодные для преобразования энергии. Устройства для преобразования энергии приливных течений будут практически сходны с аналогичными устройствами, приводимыми в действие течениями рек.

Соотношения, позволяющие оценить мощность приливных течений, подобны тем, которые используются в ветроэнергетике, при этом следует иметь в виду, что плотность воды во много раз выше плотности воздуха, а скорости течения воды сравнительно низки.

Плотность мощности потока воды, Вт/м<sup>2</sup>, равна

$$q = \rho \frac{V^3}{2}. \quad (12.1)$$

В случае приливного или речного течения при скорости, например, 3 м/с  $q = 1000 \cdot \frac{3^3}{2} = 13500$  Вт /м<sup>2</sup>. Только часть полной энергии потока может быть преобразована в полезную. Как и для ветра, это значение  $\eta$  не может превышать 60 %. На практике оказывается, что  $\eta$  можно довести максимум до 40 %.

Скорости приливных течений изменяются во времени примерно как

$$V = V_0 \sin \frac{2\pi t}{\tau}, \quad (12.2)$$

где  $\tau$  – период естественного прилива, 12 ч 25 мин для полусуточного;

$V_0$  – максимальная скорость течения, м/с.

Таким образом, электрическая мощность, снимаемая с 1 м<sup>2</sup> площади поперечного сечения потока (с учетом 40% эффективности преобразования энергии потока в электрическую), в среднем равняется

$$\bar{q} \approx 0,1\rho V^3. \quad (12.3)$$

При максимальной скорости около 5 м/с, встречающейся в проливах между островами,  $\bar{q} \approx 14$  кВт/м<sup>2</sup>. Перекрыв площадь 1 000 м<sup>2</sup>, можно получить полную среднюю мощность электростанции около 14 МВт.

Уже разработан целый ряд современных устройств для преобразования энергии приливных течений, один из которых показан на рис. 12.1. Капитальные затраты на создание подобных устройств в расчете на 1 кВт установленной мощности достаточно высоки, поэтому их строительство целесообразно лишь в отдаленных районах с высокими скоростями приливных течений, где любые альтернативные источники энергии еще более дороги.

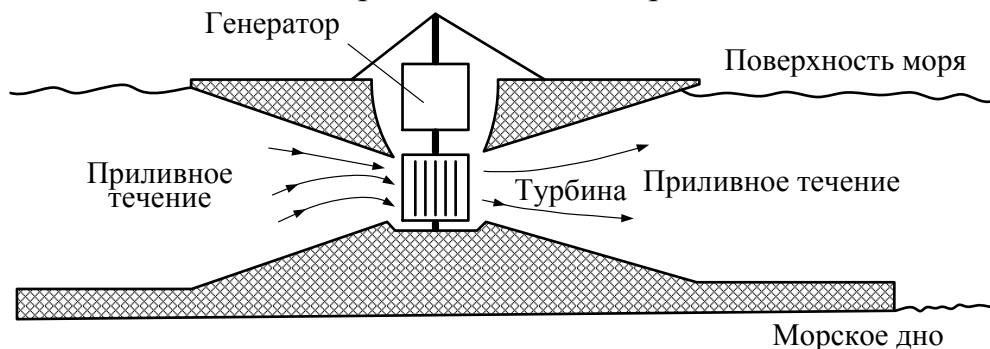


Рис. 12.1. Схема электростанции на приливном течении

Основы теории приливной энергетики достаточно просты. Предположим, что бассейн ПЭС наполняется при высокой воде и опустошается через турбины при малой воде (рис. 12.2). Пусть бассейн имеет постоянную площадь  $A$ , остающуюся покрытой водой при малой воде. Допустим, что поступившая в бассейн вода имеет массу  $\rho AR$ , сосредоточенную в центре тяжести на высоте  $\frac{R}{2}$  от уровня малой воды, и что вся вода вытекает из бассейна при малой воде. Потенциально максимальную энергию от прилива можно получить, если вся вода падает с высоты  $\frac{R}{2}$ . В этом случае энергия прилива

$$E = (\rho AR) \frac{gR}{2}. \quad (12.4)$$

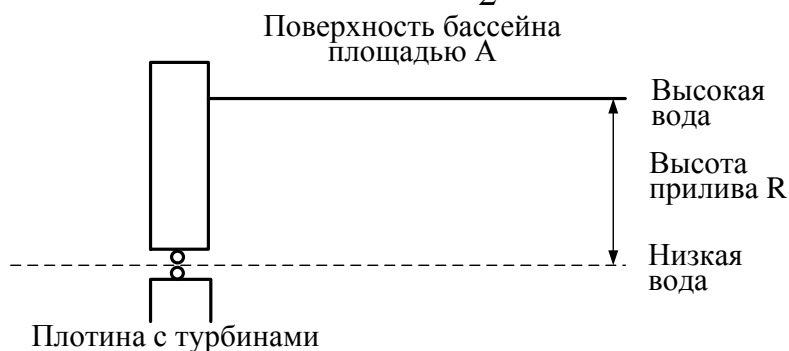


Рис. 12.2. Схема извлечения приливной энергии

Если энергия преобразуется в течение продолжительности периода прилива, то средняя потенциальная мощность за приливный период оказывается равной

$$E = \frac{\rho AR^2 g}{2\tau}. \quad (12.5)$$

На практике в системе, использующей срабатывание запаса воды из за-

полняемого в прилив бассейна, несмотря на достаточно высокую эффективность преобразования получить максимальную мощность нельзя. Этому препятствуют следующие обстоятельства.

Генерирование электроэнергии не может быть обеспечено вплоть до условий малой воды, таким образом, часть потенциальной энергии прилива не может быть преобразована.

Турбины ПЭС должны работать при низком напоре и при больших скоростях потоков – условия необычные для имеющейся обычной гидроэнергетической практики.

Невозможно равномерно снабжать потребителей электроэнергией из-за изменения уровня воды в бассейне.

На рис. 12.2 показано, что ПЭС может работать как при опустошении бассейна, так и при его наполнении. Оптимальная станция, использующая реверсируемые гидроагрегаты, которые, кроме того, можно еще использовать и в насосном режиме для повышения уровня в бассейне, может перерабатывать до 90% потенциальной энергии прилива.

### 12.3. Использование энергии океанских течений

Механическая мощность, которую можно извлечь из океанского течения, определяется тем же соотношением, которое используется для оценки этой величины в ветроэнергетике:

$$P = \eta A \rho \frac{V^3}{2}. \quad (12.6)$$

Коэффициент преобразования энергии, зависящий от типа турбины, для выполнения приближенных расчетов можно принять равным 0,6 для свободно вращающегося рабочего колеса и 0,75 для того же колеса в насадке. Строительство крупных ветровых турбин (диаметром до 200 м) практически невозможно из-за ограничений, связанных с прочностью материалов и массовыми характеристиками подобных устройств. Для турбин, работающих в морской среде, массовые ограничения менее существенны из-за действия на элементы конструкций силы Архимеда. Повышенная плотность воды позволяет, кроме того, уменьшить столь существенное для воздушных турбин воздействие вибраций, вызывающих усталостное разрушение материалов.

Важное достоинство океанских течений в качестве источников энергии по сравнению с ветровыми потоками – отсутствие резких изменений скорости (сравните с изменениями скорости при порывах ветра, при ураганах и т.п.). При достаточном заглублении в толщу воды турбины ОГЭС надежно защищены от волн и штормов на поверхности. Для эффективного использования течений в энергетике необходимо, чтобы они обладали определенными характеристиками. В частности, требуются достаточно высокие скорости потоков, устойчивость по скорости и направлению, удобная для строительства и обслуживания география дна и побережья. Удаленность от побережья влечет удорожание транспортировки энергии и обслуживания этих станций, как, впрочем, и любых других. Большие глубины требуют увеличения затрат на сооружение и обслу-

живание якорных систем, малые – создают помехи судоходству. Именно географические факторы не позволяют сейчас говорить о строительстве ОГЭС в открытом океане, где несут свои воды наиболее мощные течения. При средних и малых глубинах, особенно в местах образования приливных течений, важную роль играет топография дна.

В качестве недостатков преобразователей энергии океанских течений следует отметить необходимость создавать и обслуживать гигантские конструкции в морской воде, подверженность этих конструкций обрастанию и коррозии, трудности передачи энергии.

#### **12.4. Общая характеристика технических решений**

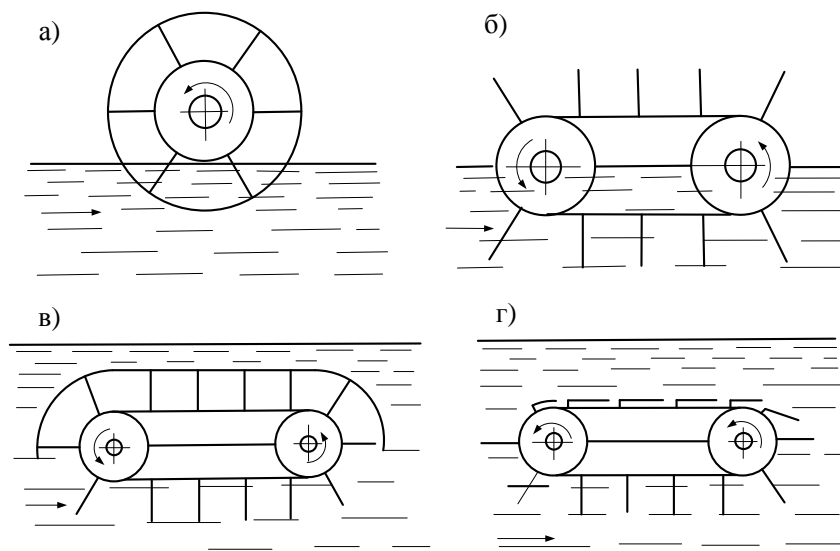
По аналогии с ВЭУ существующие преобразователи энергии течений можно условно разделить на две группы. К первой целесообразно отнести те из них, в основу которых положен принцип преобразования скоростного напора во вращательное движение турбин. Ко второй, менее многочисленной, группе относят преобразователи, основанные на других физических принципах (объемные насосы, упругие преобразователи и др.).

Для характеристики схем установки преобразователей можно выделить две основные схемы – сооружений, закрепляемых на морском дне, и сооружений, плавающих в толще воды и заякоренных к дну.

Родоначальником устройств первой группы по праву считают водяное колесо (рис. 12.3, а). В совершенствовании водяного колеса наблюдаются две основные тенденции. Одна – собственно улучшение показателей колеса (за счет оптимизации конструкции ферм, лопастей, механизмов передачи энергии, расположения по отношению к потоку, применения современных материалов и т.п.), другая – принципиальное изменение представлений о колесе.

Ленточное колесо (рис. 12.3, б) оказывается более компактным, требует меньше материалов, менее подвержено воздействию атмосферы. Подобное устройство может быть установлено в потоке на понтонах с таким расчетом, чтобы нижние лопасти входили в воду, а верхние оставались «сухими». Эффективность преобразования скоростного напора повышается за счет того, что сразу несколько лопастей оказываются под воздействием потока. Однако, простое увеличение числа лопастей ленточного колеса не приведет к существенному увеличению момента на валах.

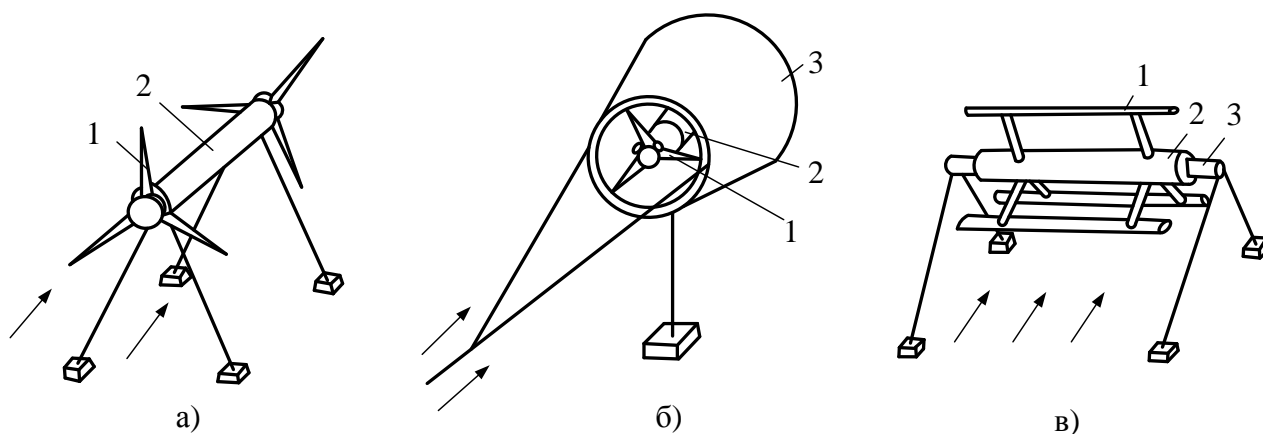
На базе ленточного колеса созданы устройства, полностью погружаемые в толщу потоков (рис. 12.3, в, г). Для таких устройств предлагается несколько способов уменьшения сопротивления движению ленты во время холостого хода. Это и сооружение воздушной камеры над колесом и применение различных вариантов механизмов складывания лопастей.



**Рис. 12.3. Эволюция водяного колеса:**

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

Наибольшие надежды гидроэнергетики, занимающиеся разработкой преобразователей энергии океанских течений, связывают с агрегатами, с помощью которых могут быть получены значительные единичные мощности. В качестве вариантов таких устройств рассматриваются рабочее колесо в виде свободного пропеллера, пропеллера в насадке, водяной аналог турбины Дарье, системы с управляемым крылом (рис. 12.4, а-в). Во всех этих конструкциях, так же как и у перспективных ветровых турбин, главный преобразующий элемент – крыловой профиль, обтекание которого потоком создает гидродинамическую силу, заставляющую турбины вращаться.



**12.4. Варианты схем перспективных турбин для ОГЭС:**

а – свободный ротор; б – ротор в насадке; в – ротор, устанавливаемый поперек потока

Наилучшими показателями обладает турбина, выполненная в виде рабочего колеса с горизонтальной осью в насадке. Это объясняется тем, что такое рабочее колесо меньше возмущает поток, не так сильно, как свободное, вовлекая жидкость во вращательное движение. Насадок как бы отделяет возмущенную часть потока от невозмущенной и в то же время обеспечивает некоторую концентрацию энергии. Форму насадка выбирают из такого расчета, чтобы



обеспечить плавное безотрывное течение потока на подходе к турбине, сделать всю систему устойчивой на потоке, максимально снизить завихренность потока на выходе из нее.

Увеличения мощности одного такого агрегата можно достигнуть за счет удлинения крыла. По сравнению с ветровыми преобразователями океанские турбины в этом плане имеют преимущество: критический размер крыла, при котором в нем достигается предел прочности материалов для такой турбины выше. Но есть ограничения и в воде: при слишком большой длине крыла на смену изгибающим моментам, создаваемым под воздействием силы тяжести, приходят моменты, создаваемые силой давления потока.

Другое ограничение диаметра рабочего колеса связано с технологическими трудностями при постройке и установке столь громоздких сооружений в океане. Специалисты сходятся во мнении, что диаметр турбин в насадках вряд ли превысит 200 м (по габаритам подобное сооружение напоминает крытый стадион на 20 тысяч зрителей). Накопленный к настоящему времени опыт строительства эксплуатационных платформ для добычи нефти и газа водоизмещением в сотни тысяч тонн показывает, что такие объекты могут быть созданы.

Рассмотрим преобразователи энергии потоков, относящиеся по нашей классификации ко второй группе, и, прежде всего, устройства типа объемного насоса. На рис. 12.5 изображена одна из схем такого устройства, в основе которого – неподвижно закрепленное в потоке сопло Вентури. В пережатом сечении сопла из-за увеличения скорости жидкости происходит падение статического давления, которое может быть использовано, например, для засасывания воздуха с поверхности. В выходном сечении уже сжатый воздух вытесняется из потока в напорную камеру, откуда по ступает в воздухопровод турбины, соединенной с электрогенератором. При умеренных степенях пережатия потока работа такого устройства может быть описана с помощью уравнения Бернулли. В этом случае перепад давлений, который создается насосом,

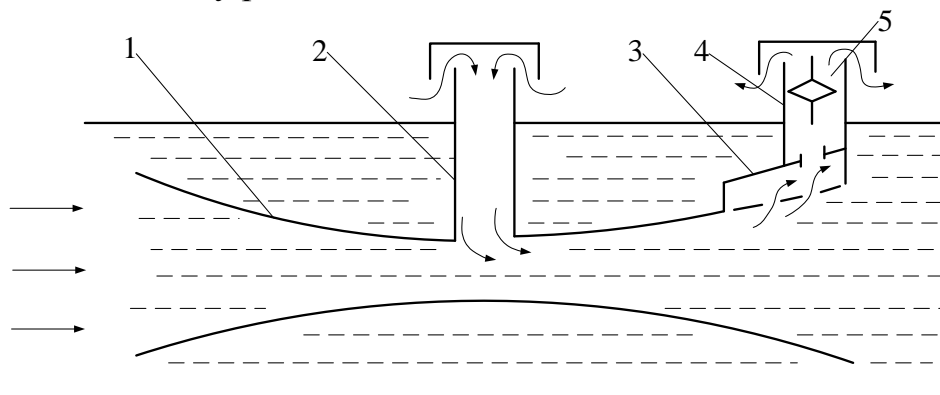
$$\Delta p = p_1 - p_2 = 0,5 \rho v^2 \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right], \quad (12.7)$$

где  $A_1/A_2$  – отношение площадей входного и минимального сечений конфузора.

Производительность такого насоса зависит от расхода жидкости через сечение насоса и может быть доведена примерно до 20 % объемного расхода. Эжекционные свойства сильно зависят от способа ввода в поток подсасываемого газа.

Перечень различных вариантов преобразователей можно продолжить, но важно отметить, что со временем могут быть открыты как более эффективные способы преобразования энергии потоков в океане, так и новые гидродинамические явления, которые потребуют принципиально новых разработок. Уже сейчас можно обратить внимание на энергию океанских противотечений, скрытых толщей поверхностных вод и часто лишь достаточно тонкими пограничными слоями отделенных от поверхностных; энергию различных вихрей,

возникающих в открытом океане под воздействием метеорологических возмущений и крупномасштабной гидродинамической неустойчивости в океанах. Известны даже постоянно действующие вихри. Один из них находится в 400 км от Огасавары (Япония) в Тихом океане. Он представляет собой водоворот диаметром около 200 км, поднимающийся с глубины 3 км почти до самой поверхности. Примечательна одна из особенностей водоворота – примерно через каждые 100 дней он изменяет направление вращения на обратное. По оценкам японских ученых удельные энергетические характеристики этого водоворота значительно выше, чем у ряда океанских течений.



**Рис. 12.5. Схема объемного насоса:**

1 – профилированный корпус; 2 – шахта воздухозаборника; 3 – воздухосборник;  
4 – выхлопная шахта; 5 – воздушная турбина с электрогенератором

## Вопросы к главе 12

1. Общие сведения об использовании энергии приливов.
2. Мощность приливных течений и приливного подъема воды.
3. Использование энергии океанских течений.
4. Общая характеристика технических решений.

## 13. Преобразование тепловой энергии океана

### 13.1. Ресурсы тепловой энергии океана

Мировой океан – крупнейший естественный коллектор солнечного излучения. В нем между теплыми, поглощающими солнечное излучение поверхностными водами и более холодными придонными достигается разность температур в 20 °С. Это обеспечивает непрерывно пополняемый запас тепловой энергии, которая принципиально может быть преобразована в другие виды. Сам термин «преобразование тепловой энергии океана» (ОТЕС) – «ocean thermal energy conversion» – означает преобразование некоторой части этой тепловой энергии в работу и далее в электроэнергию.

Преобразование тепловой энергии, запасенной океаном, в механическую энергию и далее в электроэнергию требует создания тепловой машины, тем или иным способом использующей естественный перепад температур между прогретыми поверхностными и охлажденными глубинными слоями вод. В первом приближении доля преобразуемой энергии может быть определена через КПД термодинамического цикла Карно как  $\Delta T/T$ , где  $\Delta T$  – величина перепада температур между нагревателем и холодильником;  $T$  – абсолютное значение температуры нагревателя (К). Соответственно для определения реализуемых запасов тепловой энергии необходимы сведения о распределении температур на поверхности океана, толщине прогретого слоя, глубине залегания слоя холодных вод, скорости перемещения водных масс.

Первая такая приближенная оценка была выполнена в 1977 г. Она базировалась на том, что в среднем по Мировому океану разность температур между поверхностью и глубинами примерно в 400 м составляет 12 °С, лишь в некоторых районах вблизи экватора достигая 20 °С. Считая в среднем, что разность температур в 12 °С сохраняется на всей свободной ото льда поверхности площадью около  $3 \cdot 10^{14}$  м<sup>2</sup> в слое толщиной 100 м, общую тепловую энергию, присутствующую в океане в любой момент времени, можно оценить как

$$W = \rho v c_p \Delta T, \quad (13.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

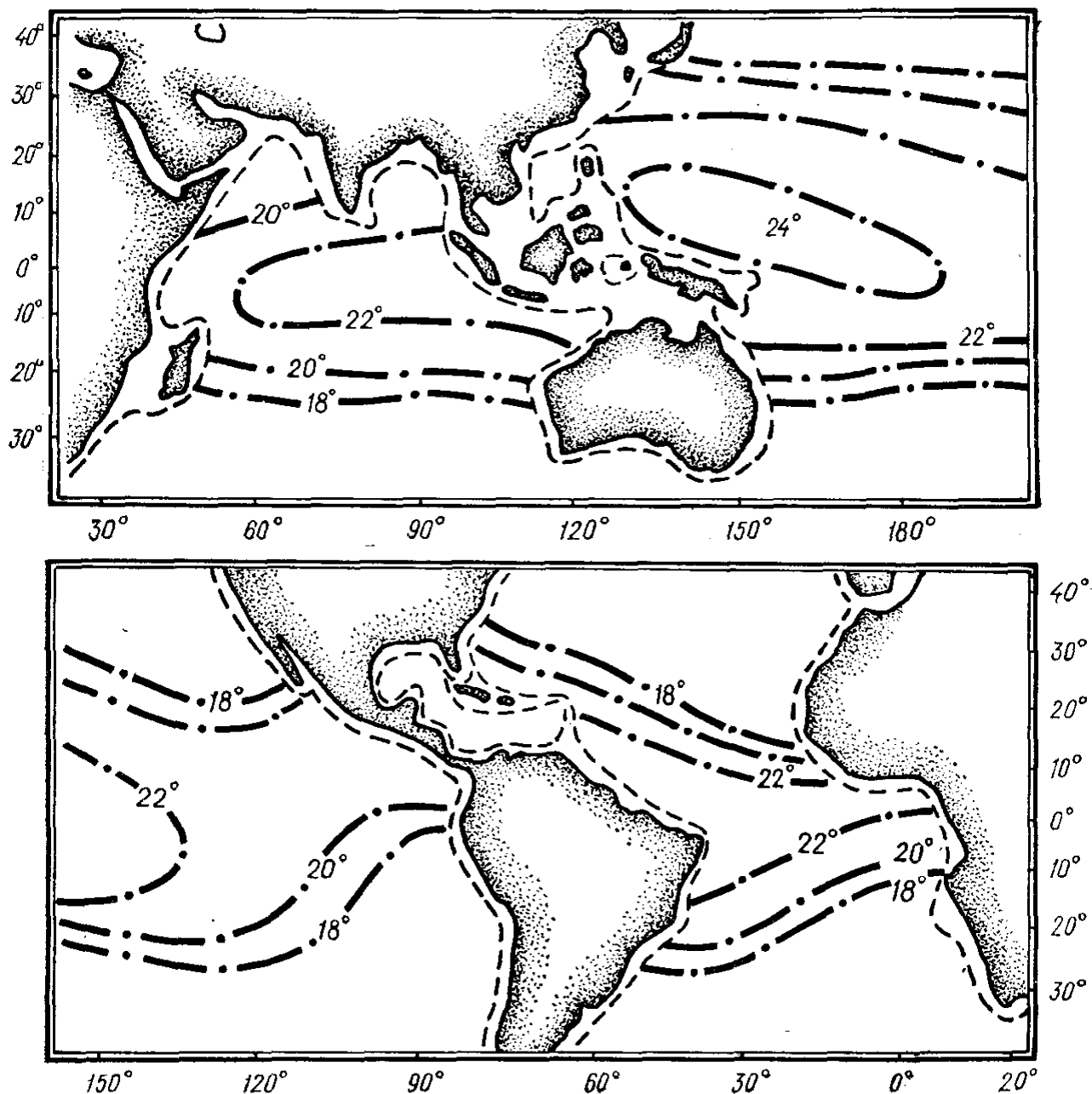
$v$  – объем нагретых вод, м<sup>3</sup>;

$c_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Полагая  $c_p = 4,19$  кДж/(кг·К), величина запасенной энергии  $W = 15 \cdot 10^{23}$  Дж.

Более точные оценки требуют знания картины распределения температур. О распределении перепадов температур на поверхности Мирового океана дает представление рис. 13.1. Карты показывают, что площадь зоны с постоянным максимальным перепадом температур не так уж велика и составляет примерно 20 млн км<sup>2</sup>. Ценой снижения КПД идеального цикла на 1 % эту зону возможного размещения тепловых преобразователей можно увеличить примерно в 6–7 раз. Постоянство перепада температур в случае изъятия части энергии должно

обеспечиваться притоком энергии за счет перемещения, водных масс и поглощения солнечного излучения.



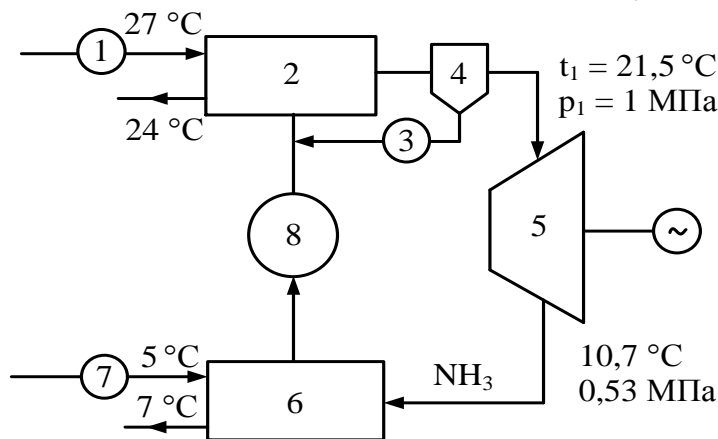
**Рис. 13.1. Распределение перепадов температур в приэкваториальных зонах Мирового океана (пунктиром отмечены глубины 1000 м)**

Определение ресурсов тепловой энергии, связанной с океаном, будет не полным, если не учесть потенциальные возможности еще двух температурных перепадов, существующих между приповерхностными слоями воздуха и поверхностными слоями воды и между придонными водами и породами, слагающими дно. Эти ресурсы пока не оценены, однако уже ведутся работы по созданию действующих моделей преобразователей, использующих первый перепад, который представляет особый интерес для Арктики, где в зимнее время – практически не менее 8 месяцев в году – температуры воздуха лежат ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  при относительно постоянных температурах воды подо льдом  $+2 - +3^{\circ}\text{C}$ . Расчеты показывают, что при таком перепаде каждый  $1\text{ м}^3$  морской воды, будучи

пропущен за 1 с через преобразователь, позволяет получить около 10 кВт мощности при КПД установки 5 %.

### 13.2. Схема ОТЭС, работающей по замкнутому циклу

Схема установки, работающей по замкнутому циклу, приведена на рис. 13.2. В такой системе с помощью теплых поверхностных вод, прокачиваемых насосом через теплообменник испарителя, превращают в пар какое-либо подходящее рабочее тело (аммиак, фреон, пропан), создают пар повышенного давления, давая ему возможность расширяться через турбину в холодильник, где пар конденсируется при контакте с охлаждаемыми поверхностями второго теплообменника, омываемого водой, закачиваемой из глубинных слоев океана.



**Рис. 13.2. Схема термальной установки, работающей по замкнутому циклу:**

1 – насос теплой воды; 2 – испаритель; 3 – насос осушителя парообразного рабочего тела; 4 – осушитель; 5 – турбина с электрогенератором; 6 – конденсатор; 7 – насос для забора холодной воды; 8 – насос для подачи рабочего тела

На рис. 13.2 показан термодинамический цикл такой тепловой машины (цикл Ренкина) в координатах абсолютная температура-энтропия. Полезная работа, совершаемая паром в турбине, определяется ветвью 1–2, на участке 2–3 происходит конденсация, затем насосом рабочее тело подается в испаритель 3–4, где нагревается (ветвь 4–5) и испаряется (ветвь 5–1). Таким образом, подвод рабочего тела к системе тепла осуществляется на ветви 4–5–1, а отвод – на ветви 2–3. Дополнительную работу приходится затрачивать на закачку конденсата в испаритель (3–4) и на подачу воды в нагреватель и холодильник.

Максимальный теоретический КПД такой системы определяется разностью температур воды, подаваемой в нагреватель и холодильник, как КПД эквивалентного цикла Карно  $\eta_K = \frac{T_{01} - T_{02}}{T_{01}}$ . Для перепадов температур между по-

верхностными и глубинными слоями воды в пределах от 15 до 26 °C он соответственно изменяется в диапазоне от 5 до 9 %. Реальный КПД, как правило, существенно ниже. Это связано с конструктивными ограничениями, не позволяющими в реальной установке довести температуру паров и конденсата до температуры теплых и холодных вод соответственно (на рис. 13.3 это подчерк-

нуто с помощью разностей температур  $\Delta T_H = T_{01} - T_1$  и  $\Delta T_K = T_2 - T_{02}$ . Конкретные температуры приведены на рис. 13.2. Можно подсчитать, что при теоретическом КПД, равном 7,3 %, на турбине получаем величину примерно в 2 раза меньшую – 3,6 %. Причем она не учитывает еще потерь на собственные нужды станции, которые сведут КПД до величины, меньшей 2,5 %. Это, в свою очередь, означает, что для получения 1 МВт «полезной» мощности через теплообменники такой станции должно пройти не менее 40 МВт тепловой мощности. Именно поэтому ОТЭС требуют огромных расходов теплой и холодной воды, измеряемых в тысячах кубометров в секунду.

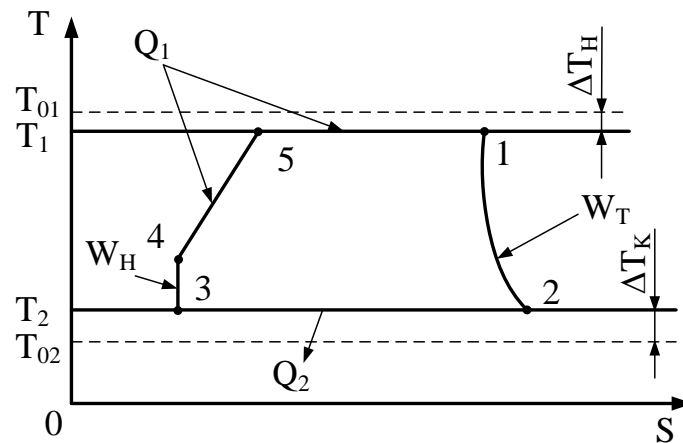
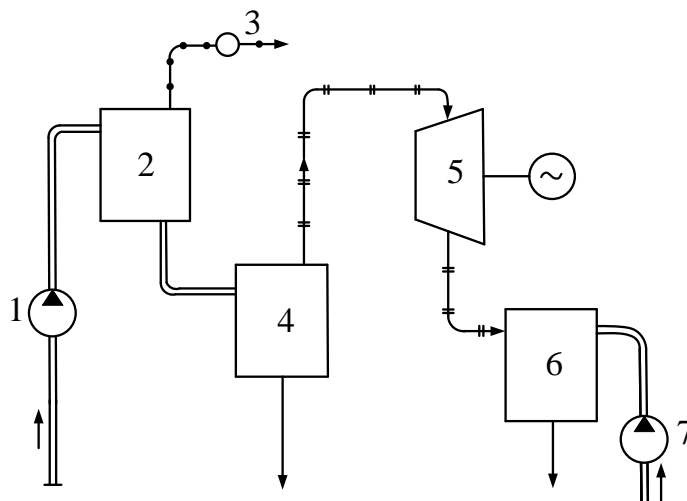


Рис. 13.3. Термодинамический цикл ОТЭС (цикл Ренкина)

Для того чтобы представить себе, что же такое реальная промышленная ОТЭС, достаточно указать такие ориентировочные цифры: станция мощностью 40 МВт (плавучая) должна иметь водоизмещение примерно 70 тыс. т, диаметр трубопровода холодной воды 10 м и рабочую поверхность теплообменника около 45 тыс. м<sup>2</sup>.

### 13.3. Схема ОТЭС, работающей по открытому циклу

Схема установки, работающей по **открытому циклу Клода**, показана на рис. 13.4. В качестве рабочего тела здесь использована морская вода, подаваемая в испаритель через деаэратор, освобождающий воду от растворенных в ней газов. Предварительно из полостей испарителя и конденсатора удаляется воздух, так что давление над поверхностью жидкости определяется только давлением насыщенных паров, которое сильно зависит от температуры. При характерных для ОТЭС температурах этот перепад составляет примерно 1,6 кПа (при замкнутом цикле на аммиаке около 500 кПа), под действием этого перепада пары воды приводят в движение турбину, попадают в конденсатор, где и превращаются в жидкость.



**Рис. 13.4. Схема ОТЭС, работающей по открытому циклу (цикл Клода):**  
 1 – насос теплой воды; 2 – деаэратор; 3 – вакуумный насос; 4 – испаритель; 5 – турбина с электрогенератором; 6 – конденсатор; 7 – насос для подъема холодной воды

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

### 13.4. Использование перепада температур океан-атмосфера

Идея использования перепада температур между холодным воздухом и незамерзающей (теплой) водой подо льдом Арктики впервые была высказана во Франции А. Баржо, развившим идею Д'Арсонваля по преобразованию тепловой энергии, запасенной в океане. В нашей стране с ее протяженным арктическим шельфом работы в этой области всегда вызывали интерес. Достаточно указать на проекты Г. Покровского (1901–1979 гг.), на работы, выполненные под руководством В. И. Марочка во Владивостоке, на проведенные там же исследования А. К. Ильина и В. В. Тикменова.

Особенность работы таких станций – так называемый «треугольный» цикл: нагрев и испарение рабочего тела в результате политропного процесса, адиабатное расширение через турбину, изотермическое сжатие при подаче в испаритель с одновременным отводом избыточного тепла в холодильник. КПД такого цикла, как показано в одной из работ А. К. Ильина, ниже термического КПД цикла Карно примерно в 2 раза. С точностью до 1 % он определяется выражением  $\eta = \frac{T_{01} - T_{02}}{2T_{01}}$ , где  $T_{01}$  – температура теплой подледной воды (275 К);

$T_{02}$  – температура охлаждающего воздуха (до 233 К). Значительный перепад температур сможет компенсировать снижение КПД. Теоретическую мощность такой ОТЭС можно оценить с помощью формулы В. А. Акуличева

$$P = \rho k c_p u A \eta \frac{(T_{01} - T_{02})^2}{2T_{01}}, \quad (13.2)$$

где  $k = H/L$  – отношение толщины используемого слоя теплой воды к характерной длине возмущения среды вдоль течения;

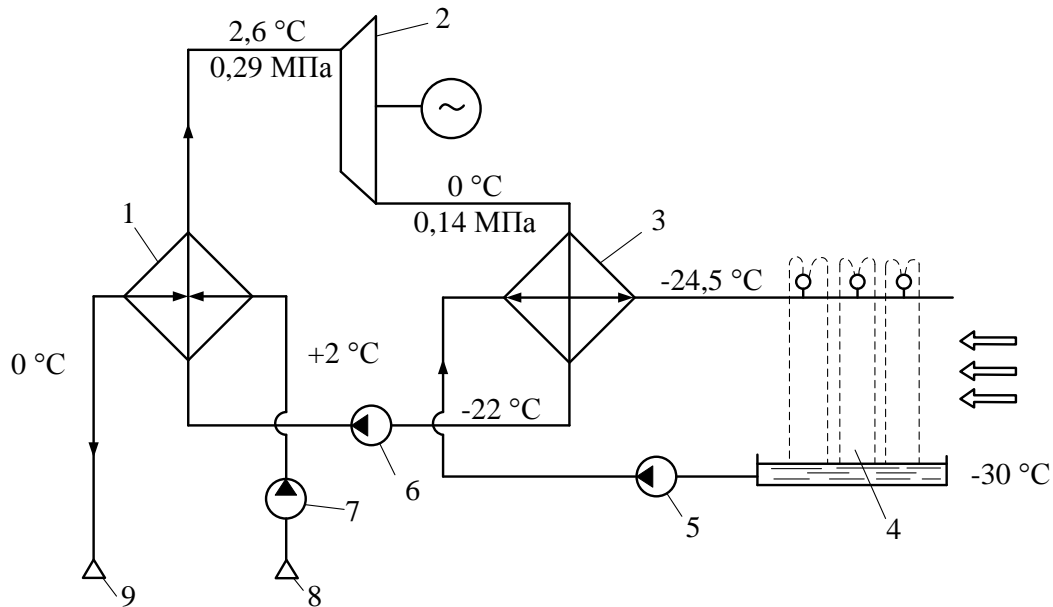
$u$  – скорость течения;

$A$  – площадь взаимодействия станции с океаном;

$\eta$  – коэффициент потерь в агрегатах и системах.

Если положить в этом выражении  $k = 1$  и считать механические потери в агрегатах станции пренебрежимо малыми ( $\eta_m = 1$ ), то удельная мощность, получаемая с  $1 \text{ м}^2$  площади океана при разности температур воды и воздуха, равной  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , составляет примерно  $18 \text{ кВт/м}^2$  при разности  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $60 \text{ кВт/м}^2$ , а при разности  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $125 \text{ кВт/м}^2$ . В этих оценках величина скорости движения воды принята равной  $0,02 \text{ м/с}$  – характерная скорость для прибрежных районов Северного Ледовитого океана. Таким образом, при отсутствии ограничений по глубине океана в зоне размещения полярной ОТЭС и мощности в  $1 \text{ МВт}$  она будет возмущать тепловой режим на площади всего около  $20 \text{ м}^2$ .

На рис. 13.5 приведена разработанная А. К. Ильиным и В. В. Тикменовым схема АОТЭС с обдуваемыми воздухом теплообменниками. В ней использован дополнительный контур с промежуточным теплоносителем, позволяющий существенно снизить потери энергии на собственные нужды станции.



**Рис. 13.5. Схема арктической ОТЭС на перепаде вода–воздух:**

- 1 – испаритель основного контура; 2 – турбина с электрогенератором; 3 – конденсатор;  
 4 – теплообменник контура охлаждения промежуточного рабочего тела; 5 – насос для подачи хладагента; 6 – насос для подачи рабочего тела; 7 – насос для подачи морской воды;  
 8 – водозаборник; 9 – патрубок сброса отработанной воды

Схема напоминает обычные тепловые станции с градирнями для охлаждения отработавшей воды, но данные градирни действуют в условиях, когда температура наружного воздуха много ниже нуля, а охлаждаемая жидкость имеет температуру всего на несколько градусов выше. Поэтому в охлаждающем контуре такой станции необходимо использовать рассол с низкой темпера-



турой замерзания. В качестве промежуточного теплоносителя применяется водный раствор хлористого кальция с концентрацией не менее 26 кг на 100 кг воды, который достаточно широко используется в холодильной технике. Рабочим телом в основном контуре станции служит фреон-12, пары которого приводят в движение турбину с электрогенератором.

Промежуточный теплоноситель охлаждается путем разбрызгивания через форсунки оросительного охладителя. Причем важно обеспечить определенное распыление, чтобы, с одной стороны, капли теплоносителя не выносились потоком холодного воздуха, а с другой – успевали охладиться во время падения. Для того чтобы капля диаметром 1 мм охладилась на 2 °С при движении в воздухе со средней разностью температур 30 °С ей необходимо пролететь в свободном падении чуть более 3 м. Распыляя таким образом раствор хлористого кальция, можно добиться удельного съема энергии более 230 Вт/(м²К). Такие значения коэффициентов теплоотдачи, конечно, уступают получаемым в настоящее время в конструкциях водо-водяных теплообменников традиционных ОТЭС (до 5 кВт/(м²К)), но превышают примерно в 5 раз характерные величины для простейших воздушных теплообменников станций без промежуточного теплоносителя. Это позволяет снизить металлоемкость конденсаторов и примерно на 20 % увеличить выработку полезной энергии.

### 13.5. Прямое преобразование тепловой энергии

Схема ОТЭС на термоэлектрических преобразователях показана на рис. 13.6. В основе ее действия – явление Зеебека, заключающееся в возникновении разности потенциалов в электрической цепи, составленной из материалов с различной концентрацией носителей заряда, места соединений которых нагреты до разных температур. Величину этой разности потенциалов можно определить по известной формуле:

$$E = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \Delta T, \quad (13.3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

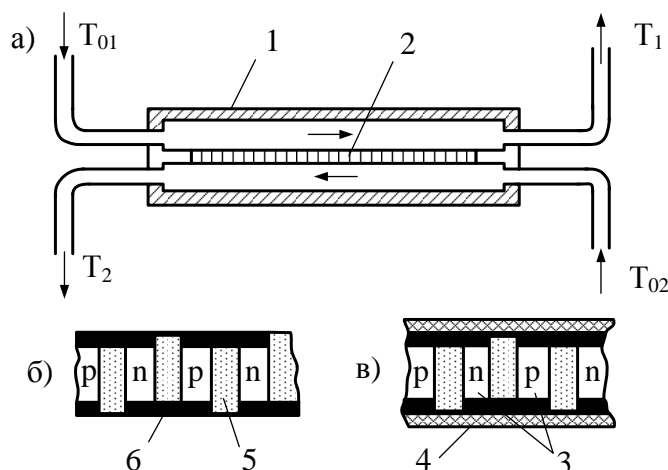
$e$  – заряд электрона;

$n_{01}$ ,  $n_{02}$  – концентрации носителей (электронов в проводниках, электронов и дырок в полупроводниках);

$\Delta T$  – разность температур между нагреваемыми и охлаждаемыми спаями (соединениями) разнородных электропроводящих материалов.

Действие такой системы полностью описывается законами термодинамики, справедливыми для обычных ОТЭС. КПД такого преобразователя, выполненного на полупроводниковых элементах, достигает 10 %. Это значительно больше, чем у систем, работающих по циклу Ренкина и Клода. Кроме того, в системах таких ОТЭС к минимуму могут быть сведены потери на собственные нужды станции. Величина термо-ЭДС для полупроводниковых пар может достигать нескольких милливольт на градус (для металлических термопар они примерно в 1000 раз ниже). Например, постоянная Зеебека для кристаллов теллурида висмута с  $n$ - и  $p$ -проводимостью равна  $3,14 \cdot 10^{-4}$  В/К. Другое достоин-

ство полупроводниковых систем – возможность обеспечения достаточно высокой теплоизоляции между нагревателем и холодильником, что сильно влияет на КПД систем.



**Рис. 13.6. Схема ОТЭС с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую:**  
а – устройство отдельного блока; б, в – варианты устройства термоэлектрического преобразователя; 1 – кожух; 2 – термоэлектрический генератор; 3 – полупроводниковые элементы с  $n$ - и  $p$ -проводимостью; 4 – поверхностное изолирующее покрытие; 5 – изолятор; 6 – соединительные шины

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

ОТЭС, созданные на описанном принципе, вероятно, можно применить для обеспечения электроэнергией комплексов подводной добычи полезных ископаемых на океанском дне.

### Вопросы к главе 13

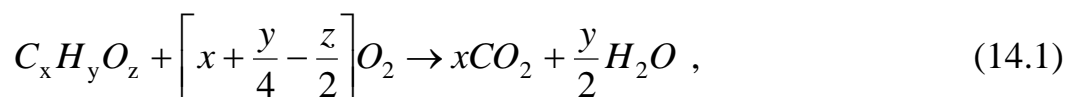
1. Ресурсы тепловой энергии океана.
2. Схема океанской теплоэлектрической станции, работающей по замкнутому циклу.
3. Схема океанской теплоэлектрической станции, работающей по открытому циклу.
4. Использование перепада температур океан-атмосфера.
5. Прямое преобразование тепловой энергии океана в электрическую.

## 14. Технология получения биотоплива

### 14.1. Сжигание

#### 14.1.1. Общие сведения

Простейшим методом получения полезной энергии из сухой биомассы является ее сжигание на воздухе. Химическая реакция полного окисления материалов, содержащих в основном углерод, кислород и водород, описывается уравнением



где  $x$ ,  $y$  и  $z$  – содержание основных элементов, входящих в состав биомассы.

Теплота реакции составляет от 16 до 24 ГДж/т абсолютно сухой биомассы в зависимости от ее типа. Если количество кислорода недостаточно для полного окисления горючего материала, тогда происходит образование углерода, оксида углерода, углеводородов и других газов, а теплота реакции снижается. Азот и другие элементы, присутствующие в биомассе, превращаются в газообразные продукты и золу.

Присутствие воды в биомассе не снижает термодинамического выхода тепла, однако практическая эффективность реакции снижается вследствие необходимости нагрева воды и ее испарения при температуре сжигания. Вода также снижает температуру пламени и скорость сжигания. Содержание воды более 30 % не дает возможности прямого сжигания биомассы, поэтому материал должен быть высушен или же к нему следует добавить топливо. Однако использование печей с псевдосжиженным слоем материала позволяет проводить сжигание при содержании воды до 55 %. Были предложены регенеративные печи, повторно использующие тепло испарившейся воды и газообразных продуктов сгорания; в этих условиях теоретически возможно сжигание материалов, насыщенных влагой. Сжигание в соответствующих камерах сгорания может явиться одним из наиболее эффективных методов использования энергетического потенциала биомассы. В печах прямого нагрева и паровых котлах использование тепла составляет 85 %, однако многие установки на практике являются значительно менее эффективными.

#### 14.1.2. Подготовка биомассы к сжиганию

Перед сжиганием тем или иным способом большинство типов биомасс необходимо определенным образом подготовить. Типы биомасс могут варьировать от плотных, относительно сухих материалов (древесина), до очень влажных, обладающих низкой теплотворной способностью (канализационные стоки, морские водоросли). Некоторые материалы (солома), обладая низкой влажностью, имеют малую плотность, поэтому работа с ними является затруднительной.

Наиболее важными этапами подготовки биомассы являются измельчение,

сортировка по размерам частиц, сушка и хранение.

Необходимые размеры древесины получают путем распила, раскола и измельчения. Предварительная сушка на воздухе проводится не всегда, а в зависимости от техники сжигания. Используют и другой метод подготовки древесины, в результате которого получают топливные гранулы или **пеллеты**. В ходе процесса древесину сушат, измельчают, сортируют по размерам частиц и добавляют связующие агенты. Полученный материал брикетируют или прессуют в более плотную массу с содержанием влаги 8–12 %. Эта технология способствует улучшению свойств биомассы как топлива, приближая их к свойствам угля. Процесс является дорогостоящим, но он обеспечивает получение материала, способного заменить обычные виды топлива.

Солому для транспортировки к месту использования прессуют в кипы, имеющие низкую плотность ( $60\text{--}200\text{ кг/м}^3$  в зависимости от типа пресс-подборщика). Кипы должны быть небольшими для облегчения погрузочно-разгрузочных работ вручную, что ведет к высоким транспортным расходам. Кроме того, кипы соломы неудобны для автоматической подачи в печи для сжигания, а измельчение соломы перед использованием приводит к увеличению издержек по подготовке биомассы.

Твердые отходы животноводства содержат обычно 70–85 % влаги. Перед сжиганием необходима предварительная сушка, которую можно осуществить путем использования топочных газов.

Хранение биологического сырья представляет особую проблему вследствие его большого объема, зачастую сезонного его поступления, а также склонности к биологическому разложению. В некоторых случаях невозможно обеспечить подачу топлива в соответствии с необходимым выделением тепла, поэтому необходима установка печей, способных работать как на обычном топливе, так и на биомассе.

### ***14.1.3. Методы сжигания***

Самый простой метод сжигания биомассы – это сжигание на открытом огне. В этих случаях эффективность сжигания очень низка. При сжигании топлива в традиционных печах отношение выделившейся энергии к энергии подведенной может быть менее 10%. В последние годы были сконструированы более эффективные дровяные печи, но их средняя эффективность пока не превышает 50 %. Основной проблемой небольших систем сжигания биомассы является накопление агрессивных масел и смол в холодных частях дымохода. Эти скопления необходимо периодически удалять. Дымоход также можно очищать путем пропускания через него горячих газов, однако наряду с удалением нежелательных соединений теряется и полезное тепло.

В промышленности в качестве топлива биомасса используется только в тех случаях, когда она представляет собой остатки от переработки биологических материалов в другие, более ценные, продукты. Два вида топлива биологического происхождения используются в промышленности, и методы сжигания их являются документально обоснованными: солома, получаемая в сельском хозяйстве, и древесные отходы деревообрабатывающей промышленности.

Практикуется сжигание соломы на фермах. Однако сгорание соломы неустойчивое и неэффективное, а дым и сажа вызывают загрязнение окружающей среды.

Отрасли деревообрабатывающей промышленности используют древесные остатки для парообразования на месте производства. Пар используется для поддержания температурных условий процесса и для выработки электроэнергии. Горячие продукты сгорания используются для сушки. Общие отходы деревообрабатывающей промышленности могут составлять до 50 % от массы сырья. Содержание влаги в отходах составляет 30–50 %. В печах сжигается как влажная (до 30 % влаги), так и сухая древесина. Как правило, оборудование для сжигания включает высокоэффективные газовые и масляные установки (на случай отсутствия отходов).

## 14.2. Пиролиз, газификация и сжижение

### 14.2.1. Пиролиз (сухая перегонка)

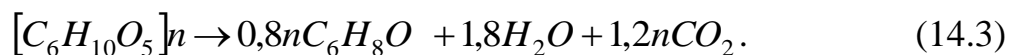
Нагрев биомассы приводит к удалению влаги (ярко выраженный эндотермический процесс). При температуре выше 100 °С биомасса начинает разлагаться, а между 250 и 600 °С основными продуктами являются уголь и маслянистая кислая смесь дегтя и различных количеств метанола, уксусной кислоты, ацетона и других органических веществ. До развития нефтехимической промышленности источником этих соединений была перегонка древесины.

В результате пиролиза целлюлозы образуется около 5 % угля, 11 % воды, 12 % летучих соединений, 6 % углекислого газа и до 60 % дегтя. При температуре свыше 600 °С жидкие продукты пиролиза могут быть газифицированы, а свыше 800 °С газифицируется также и уголь в результате эндотермической реакции углеродсодержащих молекул с водой с образованием синтез-газа, смеси оксида углерода и водорода.

Вследствие очень сложной химической природы биомассы трудно точно определить, какие химические реакции протекают в процессе тепловой обработки. Однако основными компонентами многих типов растительного материала являются целлюлоза и крахмал, а реакции сухой перегонки этих продуктов и их термодинамика известны. Сначала происходит карбонизация или обугливание (изменение энтальпии -2,9 МДж/кг)



Реакция является экзотермической, такой же, как и получение пиролитического масла (в качестве средней молекулярной формулы пиролитического масла принимается формула  $C_6H_8O$ ) (изменение энтальпии -2,1 МДж/кг)

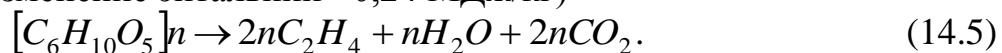


Образование синтез-газа является эндотермической реакцией (изменение энтальпии +14,6 МДж/кг углерода)



При быстром нагревании целлюлозы, как при «мгновенном» пиролизе, может образоваться некоторое количество олефинов в ходе другой эндотерми-

ческой реакции (изменение энтальпии +0,24 МДж/кг)



Несмотря на некоторые утверждения относительно автотермального характера процесса сухой перегонки биомассы, термическое обогащение биомассы обычно требует затрат теплоты, составляющих до 10 % теплоты сжигания сухой биомассы (примерно до 2 МДж/кг). Эта доля может быть значительно выше, например, при производстве угля, где происходит потеря летучих продуктов.

За исключением производства высокоценного древесного угля сухая перегонка биомассы в промышленном масштабе не используется. Древесный уголь обычно получают путем нагревания древесины до 350 °С в пиролизном реакторе. Выход составляет около 35 % топлива с энергоемкостью примерно 29 МДж/кг, т. е. сохраняется около 50 % энергии древесины.

#### 14.2.2. Окислительная газификация

Газификация биомассы кислородом дает газ средней энергоемкости, содержащий в основном оксид углерода и водород. Аналогичная реакция происходит на воздухе, но образующиеся газы разбавляются азотом, снижающим теплотворную способность. Химический процесс газификации представляет собой сочетание химического процесса сжигания с некоторыми реакциями пиролиза. Уголь, полученный в результате пиролиза, реагирует с паром или диоксидом углерода с образованием синтез-газа



Пиролизные газы претерпевают аналогичные реакции. При температуре выше 1000 °С единственными стабильными молекулами топливного газа являются молекулы  $CO$  и  $H_2$ . При более низких температурах стабильны молекулы этилена, метана и другие молекулы с небольшим весом.

Газификаторы классифицируют на газификаторы восходящего тока, нисходящего тока, кипящего слоя и взвешенного потока. Схематические диаграммы газификаторов восходящего и нисходящего токов показаны на рисунке 14.1. Такие газификаторы нуждаются в постоянном уходе и внимательном отношении при запуске, регулировании и техническом обслуживании.

Воздушные газификаторы представляют как биотопливные системы для обеспечения процессов необходимой теплотой с использованием отходов отраслей промышленности, перерабатывающих биомассу. Состав газов, полученных с использованием газификаторов, дает возможность их химического превращения в метанол и аммиак.

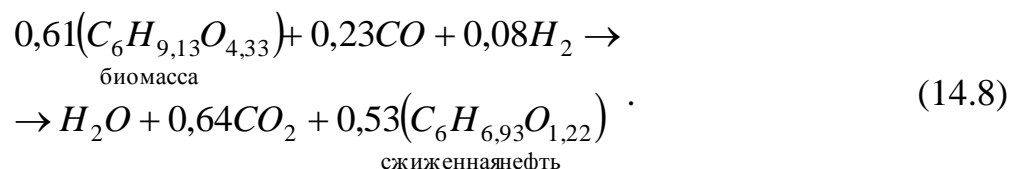


Рис. 14.1. Газификация способом нисходящего и восходящего токов

### 14.2.3. Сжижение биомассы

Существуют предложения по превращению биомассы в жидкость, напоминающую тяжелую топливную нефть, путем реакции ее с восстановительными газами (оксид углерода и водород) в присутствии катализатора. Обычно необходимо давление 250 атм и температура 60–700 °С. Процессы сжижения предполагают подготовку восстановительных газов путем пиролиза или окислительной газификации большого количества биомассы. В редких случаях можно получить дешевый водород из других источников, например при электролизе воды на гидроэлектрических установках.

Типичный процесс сжижения древесины выражается следующей реакцией



Схематически процесс показан на рисунке 14.2.

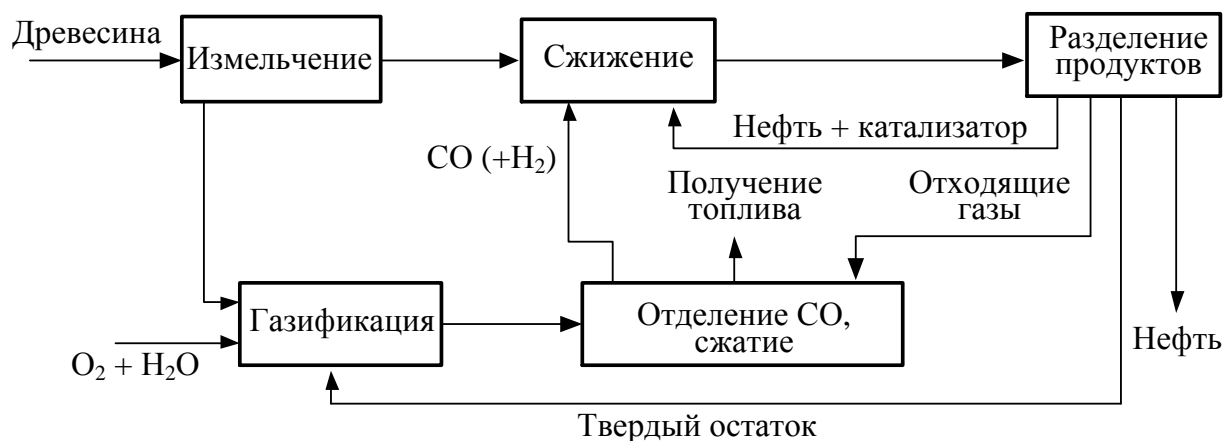


Рис. 14.2. Сжижение древесины

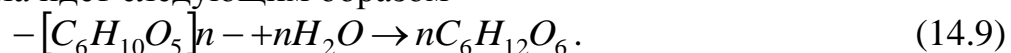
Древесину высушивают до влажности 4%, размалывают в муку и смешивают с частью произведенной нефти. В качестве катализатора добавляют карбонат натрия в количестве 5 % по массе. Смесь древесины, нефти, пара и катализатора подвергают первоначальному давлению 29 атм и нагревают до 300 °С в течение часа для обеспечения 99 % превращения древесины и выхода

нефти 56 %. Нефть рекомендована для использования в качестве бойлерного топлива ( $Q_H^P = 31,4$  МДж/кг; состав  $C^P = 76,1$  %;  $H^P = 7,3$  %;  $O^P = 16,6$  %).

### 14.3. Гидролиз, ферментация и перегонка

#### 14.3.1. Гидролиз

Все виды растительной биомассы содержат моно- и полисахариды, служащие как для аккумуляции энергии и углерода, так и в качестве структурного компонента. Перед ферментацией олигосахариды и полисахариды обычно следует гидролизовать до моносахаридов в отдельном реакторе. Гидролиз целлюлозы и крахмала идет следующим образом



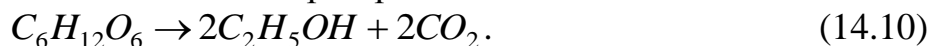
Гидролизуемость материалов (легкость, с которой происходит гидролиз) в значительной степени варьирует. Крахмал и пентозаны (гемицеллюлозы) требуют относительно мягких условий. При их гидролизе используют разбавленные кислоты и невысокие температуры; гидролиз целлюлозы проходит при более высоких температурах, с использованием более сильных кислот и реакторов под давлением. Все полисахариды также разлагаются до некоторой степени под действием ферментов. Крахмал гидролизуются относительно легко под действием как кислот, так и ферментов, в то время как целлюлоза обычно требует предварительной обработки для высвобождения связанного лигнина перед тем, как она будет подвержена ферментативному гидролизу. Скорость гидролиза целлюлозы при участии ферментов низка. Наиболее часто встречающиеся моносахариды в гидролизованной растительной биомассе – это глюкоза, фруктоза и ксилоза. Практически все природные сахара имеют в своей основе пять (пентоза) или шесть (гексоза) атомных углеродных групп. Технология гидролиза крахмала является хорошо обоснованной. Обычным промышленным сырьем являются кукуруза и другие зерновые, а также картофель, переработка которых проходит в одну или две стадии (двойная кислота, кислота/фермент или двойной фермент). Крахмал растворяется при нагревании в воде, что вызывает «разжижение» полисахаридов с расщеплением полимерных цепей кислотой или альфа-амилазой. Гидролиз до моносахаров (сахарификация) осуществляется снова кислотой или амилоглюкозидазой. Продуктивность ферментативного процесса является низкой по сравнению с химическими методами, и для осуществления максимальной сахарификации необходимо не менее трех дней.

В настоящее время промышленный гидролиз целлюлозы не осуществляется, так как разработанные ранее технологии являются неэкономичными. Разработаны усовершенствованные процессы кислого гидролиза целлюлозы, а также новейшие ферментативные процессы, включающие многофазовые реакции при различных температурах, предварительную обработку целлюлозы и использование новых видов ферментов.



### 14.3.2. Ферментация

В анаэробных условиях моносахариды могут быть превращены в спирт с помощью различных микроорганизмов. Выход спирта при превращении гексоз с участием дрожжей рода *Saccharomyces* составляет при благоприятных условиях до 90 % от теоретической стехиометрии реакции



Однако здесь может образовываться ряд других продуктов, особенно при высоких значениях  $pH$ .

Если реакция доходит до конца, превращение ферментируемых сахаров может быть 100%. Если концентрация спирта достигает ингибиторного уровня (8–10 %), превращение может быть неполным. Рост дрожжей становится ограниченным вследствие низкого обеспечения энергией в ходе реакции; таким образом, образовавшийся спирт препятствует увеличению калорийности субстрата. Многие другие организмы, включая другие виды грибов, бактерий и зеленых растений, могут в анаэробных условиях превращать сахара в спирт, причем некоторые организмы осуществляют эти превращения с высокой эффективностью, например бактерии *Zymomonas mobilis*. Однако выход спирта часто бывает значительно меньше, чем при участии дрожжей, при этом происходит образование большого количества других продуктов, таких, как ацетаты, лактаты и глицерол.

Некоторые микроорганизмы, например виды *Clostridium*, разлагающие целлюлозу, могут сочетать оба процесса гидролиза и ферментации. Такие реакции протекают медленно, и выход спирта является низким.

Продуктивность спиртового брожения является высокой по сравнению с продуктивностью многих биологических реакций, но низкой по сравнению с продуктивностью реакций, протекающих в среде синтез-газа, используемых для получения больших объемов химических продуктов. Биологические катализаторы (дрожжи) также менее эффективны, чем химические.

В своей простейшей форме ферментация осуществляется партиями в сосудах вместимостью от 200 до 2 000 м<sup>3</sup>. Микробная «закваска» готовится заранее в неполных аэробных условиях с использованием того же субстрата, что и для ферментации. Реакция ферментации в разбавленном растворе сахара заканчивается через несколько дней; образовавшаяся жидкость содержит 5–10 % спирта, в зависимости от источника сахара. За последние годы был использован ряд новых типов ферментаторов, включая ферментаторы непрерывного действия и типа клеточной рециркуляции. Некоторые из этих ферментаторов используются в промышленности, особенно для производства этилового спирта. Периодическая ферментация предпочтительна при производстве спиртных напитков, а также в большинстве случаев производства этилового спирта, так как технология периодического производства относительно проста, не требует тщательного контроля, как при непрерывном типе производства.

### 14.3.3. Перегонка

Цель начального этапа перегонки – отделение жидкости от твердых частиц в сбрасываемой массе. Фракционирование дистиллята дает раствор, содержащий 50–70 % спирта, а при последующих (водных) перегонках концентрация спирта может быть 90–94 %. Более высокие концентрации обычно невозможны вследствие образования азеотропной смеси спирт-вода при концентрации этанола около 95 %. Таким образом, в последующих перегонках используют азеотропообразователь (бензол или циклогексан) с получением 99,9% этанола.

Кроме спирта процессы брожения и перегонки дают остатки и стоки, которые следует удалять. Остаток от перегонки имеет высокую способность к поглощению кислорода вследствие наличия несброженных сахаров и других компонентов биомассы. Объем этих остатков в 15 раз больше объема произведенного спирта. Остатки обычно сбрасывают в реки, а также вносят в почву.

На рис. 14.3 схематически показан типичный процесс получения топливного спирта из различных видов биомассы. В таблице 14.1 приведены данные по производству этанола из некоторых технических культур.

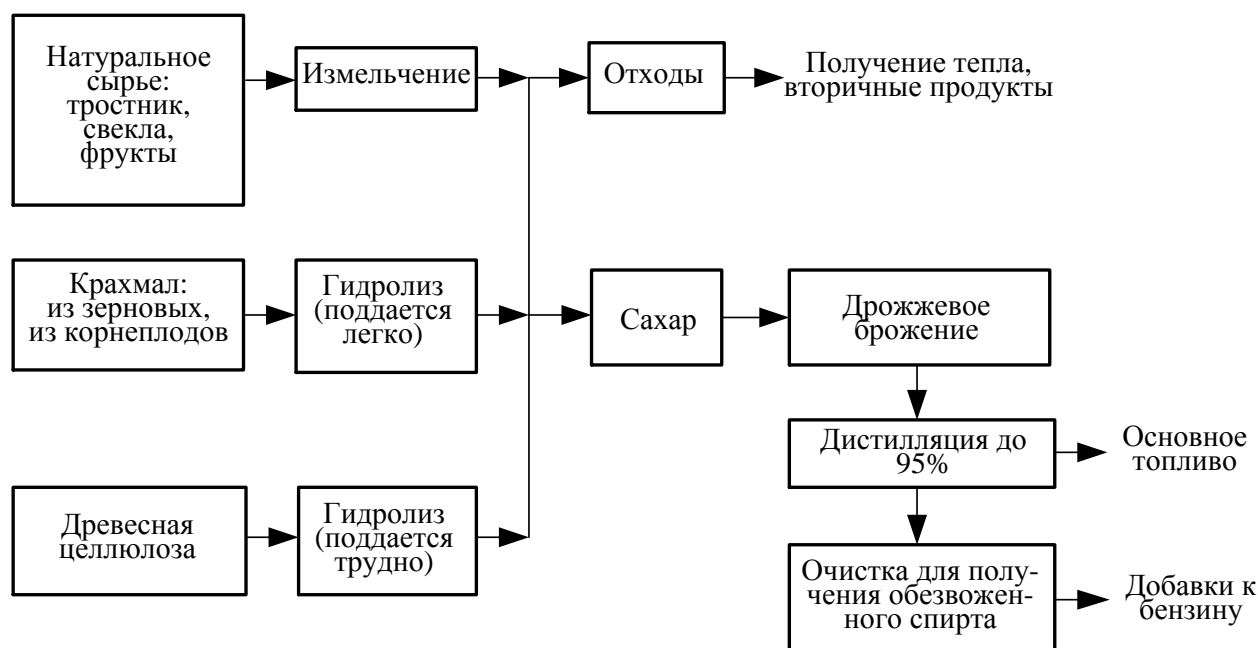


Рис. 14.3. Превращение биомассы в спирт

Таблица 14.1

Выход этанола из некоторых технических культур

Культура	Выход этанола, л/т
Сахарный тростник	70
Маниок	180
Сладкое сорго	86
Сладкий картофель	125
Зерновые (кукуруза)	370
Плодовые	160

Смесь спирта с водой, полученная в результате водной перегонки, может быть использована в качестве заменителя бензина в двигателях внутреннего сгорания. Можно вводить в несколько переделанные бензиновые двигатели прямо 95% этанол, а можно подавать в обычный двигатель смесь 100% этанола (обезвоженного) с бензином в соотношении 1:10.

**Обезвоженный этанол** – жидкость в интервале температур от  $-117$  до  $+78$  °С с температурой воспламенения  $423$  °С. Применение его в двигателе внутреннего сгорания требует специального карбюратора. Поэтому бензин смешивают с обезвоженным этанолом в соотношении 20 % по объему и используют эту смесь (**газохол**) в обычных бензиновых двигателях. Газохол в настоящее время – обычное топливо в Бразилии (этанол 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% увеличение мощности по сравнению с чистым бензином. Массовая плотность и теплотворная способность этанола ниже, чем бензина, соответственно теплота сгорания ( $24 \text{ МДж/м}^3$ ) на 40 % ниже, чем бензина ( $39 \text{ МДж/м}^3$ ). Однако лучшее горение этанола компенсирует это уменьшение теплотворной способности. Опыт подтверждает, что двигатели потребляют примерно одинаковое количество газохола и бензина.

#### 14.4. Растительные масла

Масла, парафин, смолы и другие растворимые в растворителях соединения встречаются во всех растениях. Маслянистые соединения могут составлять до 40–50 % биомассы, и они относительно легко экстрагируются.

Масла, парафины и смолы в растениях характеризуются почти таким же сложным химическим составом, как и состав сырой нефти. Алканы, изоалканы, нафтены и сложные эфиры характеризуются различной степенью ненасыщенности и замещения в различных ядрах полициклического соединения. Сильно насыщенные высокомолекулярные соединения могут находиться в твердом состоянии (парафины), в то время как полимеризованные углеводороды могут быть эластичными (природный каучук или гуттаперча). Включение кислорода в углеводородный скелет ведет к увеличению растворимости соединения в воде и появлению смолоподобных свойств. Наиболее полезными соединениями с точки зрения использования их как топлива являются смеси жидких углеводородов. В значительной мере эти соединения представлены триглицеридами со средней длиной цепи ( $C_8 - C_{20}$ ), а также насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами.

Ресурсы сырой биомассы как сырья для производства растительного масла можно разделить на две широкие группы: сельскохозяйственные культуры (соя, подсолнечник, рапс) и древесные культуры (масличная и кокосовая пальмы). Возделывание последних в основном ограничено жарким климатом и является трудоемким, так как урожай убирают вручную, в то время как выращи-

вание и сбор семян масличных культур проводятся при высоком уровне механизации.

Для получения растительных масел исходные материалы подвергаются целому ряду предварительных процессов для удаления инородных веществ, раковин и зародышей с последующим размолом. Затем мука нагревается, и масло извлекается при низком или высоком давлении и (или) путем экстрагирования с использованием трихлорэтилена или гексана. Жмых по возможности скармливают скоту, а при содержании ядовитых веществ в семенах (клещевина, тунг) он идет на удобрение. Полученное масло очищают путем нейтрализации, этилирования, дезодорации и удаления составных частей с высокой точкой плавления; из масла также удаляют растительный клей путем фильтрации через соответствующие адсорбенты.

Масла и смолы из хвойных деревьев производятся в больших количествах при периодической и непрерывной сульфатной варке древесины хвойных пород. Скипидар получают путем конденсирования паров при сухой перегонке древесной стружки и из таллового масла путем механического сбора подкисленной жидкости при варке. Талловое масло содержит 40–60 % смоляных кислот, 40–50 % жирных кислот и 5–10 % нейтральных веществ. Выход экстрактивных веществ составляет до 25 % от массы древесины. Выход таллового масла при сульфатной варке составляет 10–100 кг на 1 т пульпы, при этом при варке сосновой древесины выход выше. Ель и твердые породы дают небольшой выход таллового масла.

Эфирные масла экстрагируют путем перегонки с водяным паром под давлением в контакте с абсорбентом, а также способом экстрагирования с растворителем и прессованием. Иногда для разложения биомассы и высвобождения масел применяют процесс брожения. Для получения масел широко используют перегонные кубы. Смолы собирают большей частью с поврежденных участков поверхности растений. Приготовлению лаков и медицинских препаратов предшествует ряд обогатительных процессов.

Благодаря высокой теплотворной способности масла могут использоваться в отопительных системах и в двигателях внутреннего сгорания, главным образом в дизельных. При удалении растительного клея и влаги они могут использоваться непосредственно без модификации двигателей. Удаление воды является важным, так как растительные масла представляют собой главным образом сложные эфиры, относительно легко гидролизующиеся с образованием глицерола и жирных кислот. Последние при повышенных температурах очень агрессивны по отношению к металлам. Сопоставление свойств рапсового масла и дизельного топлива по результатам исследований [4] представлено в таблице 14.2.

Главной проблемой, связанной с натуральными маслами и не указываемой в обычных технических условиях на топливо, является их термическая нестабильность. В камере сгорания происходит быстрое накопление осадка, забивание форсунок, закоксовывание поршневых колец и застудневание смазочного масла. В результате ухудшаются рабочие характеристики двигателя и падает его мощность. Другая проблема связана с высокой вязкостью растительного масла, в результате чего снижается степень распыла масла и при низких темпе-

ратурах забиваются фильтры. Может оказаться затруднительным пуск двигателя на растительном масле, и для этой цели рекомендуется использовать дизельное топливо.

Таблица 14.2

**Свойства рапсового масла и дизельного топлива**

Свойство	Рапсовое масло	Дизельное топливо
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	917	800–845
Теплотворная способность, МДж/м <sup>3</sup>	36	42
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с	42,1	1,5–4,0
Температура вспышки, °С	100	55

## Вопросы к главе 14

1. Технология получения биотоплива. Сжигание.
2. Технология получения биотоплива. Пиролиз (сухая перегонка), окислительная газификация, сжижение биомассы.
3. Технология получения биотоплива. Гидролиз, ферментация, перегонка.
4. Биотопливо. Растительные масла.

## 15. Получение и использование биогаза

### 15.1. Сырье для производства биогаза

В качестве сырья для переработки в анаэробных условиях могут быть использованы различные отходы сельскохозяйственного производства, содержащие органическое вещество. Наиболее пригодными в этом отношении являются навозные стоки животноводства. Количество и свойства навоза и помета зависят от возраста, рациона кормления и способов содержания животных и птиц. При кормлении полноценными концентрированными кормами выход экскрементов от одного животного следующий.

На свиноводческих предприятиях: от хряков – 11,1 кг/сут; от свиноматок холостых – 8,6 кг/сут, супоросных – 10,8 кг/сут, подсосных – 12,4 кг/сут; от поросят-отъемышей 1,8 кг/сут; от свиней откормочных массой до 40 кг – 3,2 кг/сут, от 40 до 80 кг – 4,5 кг/сут, более 80 кг – 6,2 кг/сут. Общее содержание зольности в экскрементах составляет 15–16 %. Средняя влажность экскрементов составляет: у хряков 89,4 %; у свиноматок 90,8–91,0 %; у поросят отъемышей 86,0 %; у свиней откормочных – 86,6–87,5 %.

На предприятиях по выведению крупного рогатого скота (КРС): от быков-производителей – 40 кг/сут; от коров – 55 кг/сут; телят на откорме до 4 мес. – 7,5 кг/сут; молодняка на откорме от 4 до 6 мес. – 14,0 кг/сут, от 6 до 12 мес. – 26,0 кг/сут, от 12 до 18 мес. и нетели – 27,0 кг/сут, старше 18 мес. – 35,0 кг/сут. Средняя влажность экскрементов: у коров молочных пород – 88 %, у быков, молодняка, мясного скота и телят – 86%, зольность сухого вещества – 16 %. Влажность подстилочного навоза КРС зависит от способа содержания животных и количества добавляемой подстилки.

На птицеводческих предприятиях: от кур яичного направления – 170–200 г/сут; от мясных кур – 276–300 г/сут; от индеек – 450 г/сут; от уток – 420 г/сут; от гусей – 584 г/сут. Влажность помета кур и индеек составляет 73–76 %, гусей и уток – 83–85 %. При клеточном содержании усушка помета кур и молодняка старшего возраста в птичниках через 8 ч равна 10 %, через 12 ч – 13 %, через 24 ч – 27 %, усушка помета молодняка в возрасте 1–40 дней за 8 ч – 12 %, через 12 ч – 16 %, через 24 ч – 32 %. Объемная масса помета – 0,7–0,8 т/м<sup>3</sup>, зольность – 17,3 %, влажность – 55–60 %.

Суточный выход экскрементов, кг, с фермы (комплекса) можно рассчитать по формуле

$$B_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=m} B_{\Sigma i} n_i, \quad (15.1)$$

где  $B_{\Sigma i}$  – суточный выход экскрементов от одного животного производственной группы, кг;

$n_i$  – поголовье животных производственной группы, одновременно содержащихся на ферме;

$m$  – количество производственных групп на ферме.

Суточный выход жидкого навоза или стоков кроме собственно экскрементов будет включать массу технологической воды, поступающей в систему

навозоудаления в сутки; массу подстилки, используемой на ферме в сутки; массу попавших в систему навозоудаления кормов; массу земли, песка и других посторонних включений.

Экскременты животных – это неоднородная гетерогенная смесь, состоящая из твердых частиц, составляющих дисперсную фазу, а также жидкой фазы (дисперсионной среды), являющейся водным раствором солей, кислот и щелочей. Значительную часть в экскрементах занимают газы. При тщательном перемешивании с водой твердые частицы почти полностью выпадают в осадок. Плотность жидкой фазы экскрементов животных различных видов не одинакова, потому что содержит разное количество растворенных в воде сухих веществ. Например, в экскрементах коров она равна  $1\,017\text{ кг/м}^3$ , свиней –  $1\,010\text{ кг/м}^3$ .

Химический состав экскрементов зависит в основном от кормового рациона, качества кормов и вида животных. Химический состав гомогенного жидкого навоза находится в прямой зависимости от содержания в нем сухого вещества (СВ) и сухого органического вещества (СОВ). Из общего количества органической массы, скормленной животным, с экскрементами КРС выделяется 35 %, а с экскрементами откормочных свиней – 20 %. В среднем в экскрементах от одной условной головы скота в сутки содержится около 5 кг СВ. У кур-несушек среднесуточное содержание СВ в экскрементах составляет 70–100 г на одну птицу. Органическое вещество составляет 70–80 % сухой массы бесподстилочного навоза и у различных животных имеет неодинаковый состав.

Физико-механические свойства навоза зависят от рациона, возраста животных и других факторов, однако основным фактором является влажность навоза. Технологическая вода, поступающая в систему, разжижает экскременты. С увеличением влажности возрастает разница в плотности твердой и жидкой фаз. С добавлением воды дисперсионная среда разжижается, плотность понижается, а плотность твердых частиц остается почти неизменной, вследствие чего происходит интенсивное осаждение. В навозных стоках влажностью 98 % и более уже через 15 мин отстаивания в осадок выпадает до 80–85 % всех взвешенных частиц, а через 2 ч осаждается 90 %. Дальнейшее нахождение навозной массы в покое ведет к уплотнению осадка, слой которого уменьшается и через некоторое время теряет текучесть. На 7–8-е сутки в слое осадка начинается брожение, основная масса его становится более рыхлой, так как внутри появляются пузырьки газов. Осадок снова приобретает текучую структуру. На дне остается лишь плотный осадок минеральных включений, который, накапливаясь, затрудняет разгрузку навозохранилищ. Жидкий навоз влажностью до 94 % расслаивается менее интенсивно, и жидкость осветляется с четко выраженными границами слоев в свином навозе через 25–30 сут.

На скорость процесса осаждения взвесей заметное влияние оказывает температура массы. При более высокой температуре вязкость жидкой фазы снижается и навоз расслаивается быстрее.

Коррозионные свойства зависят от содержания в навозе коррозионно-активных веществ: углекислоты, аммонийного азота, сульфатной и сульфидной серы. Интенсивность коррозии находится в зависимости от вида навоза, температуры, доступа воздуха и длительности воздействия на материал, с которым он

контактирует. Величина  $pH$  бывает ниже 5,5, что необходимо учитывать при оценке коррозионного действия навоза на бетон и асбоцемент. Коррозию металлов вызывают растворенные в навозе вещества и газообразные продукты, такие, например, как аммиак и кислород. Навоз оказывает ингибирующее и пассивирующее действие на чугунные трубы, наиболее пригодные для трубопроводов, по которым непрерывно подается жидкий навоз. Промывка чугунных труб чистой водой вредна с точки зрения защиты от коррозии.

Количество газа, которое может быть выделено из различных сельскохозяйственных отходов, зависит от состава субстрата, условий протекания процесса, особенно от количества времени, в течение которого субстрат находится в биореакторе, и бактериального состава в биореакторах. Данные о выходе газа весьма разноречивы. Некоторые данные, полученные разными исследователями, приведены в таблице 15.1.

Таблица 15.1

**Выход биогаза (метана) при метановом сбраживании различных сельскохозяйственных отходов**

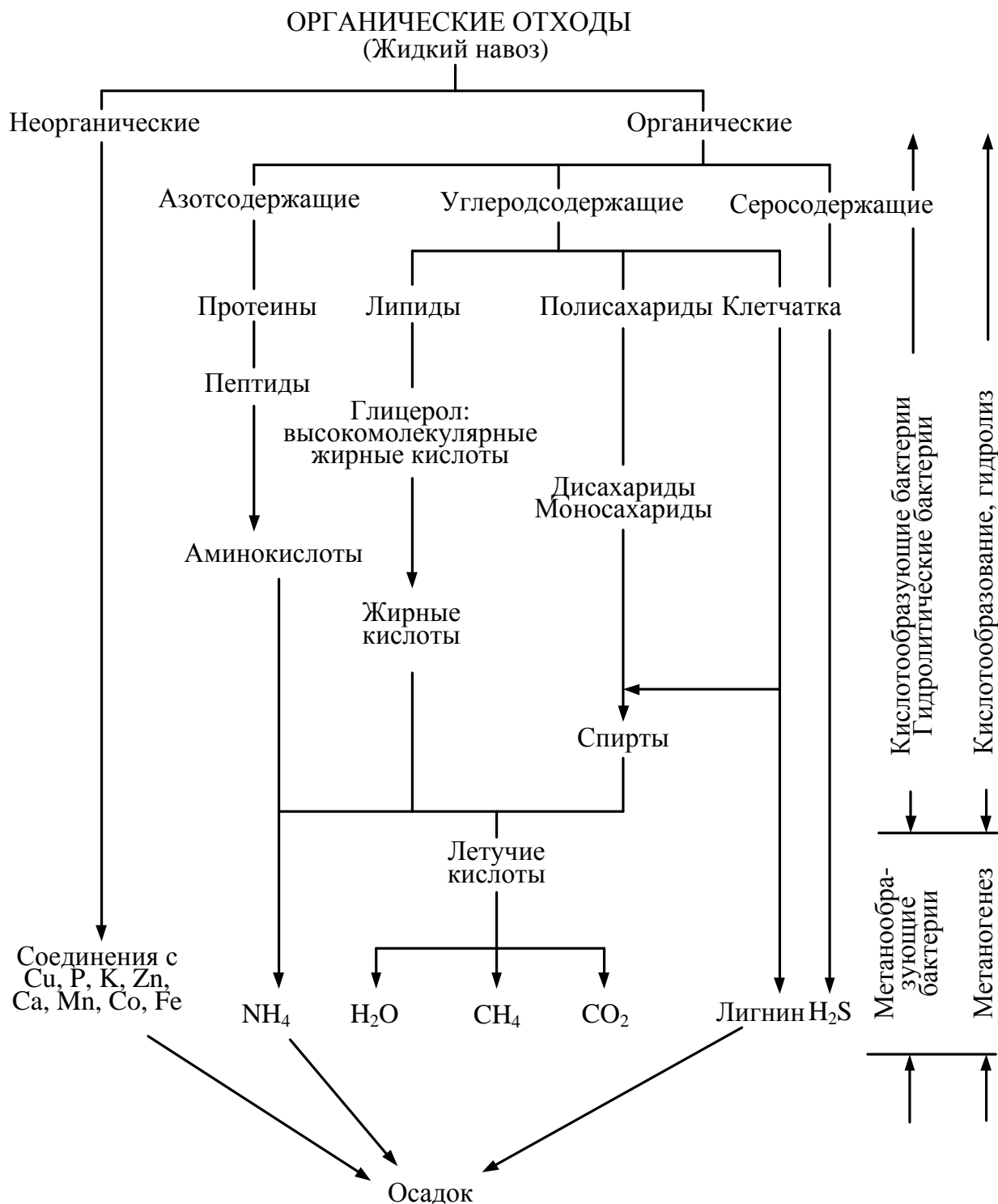
Органические отходы	Выход биогаза, м <sup>3</sup> /кг загруженного СОВ	Содержание метана, %
Свиной навоз	0,580	77,6
Навоз крупного рогатого скота	0,200–0,300	60,0
Конский навоз с соломой	0,250	56,0–60,0
Овечий навоз	0,628	70,0
Помет кур	0,370	54,0
Помет индеек	0,640	62,2

## 15.2. Биохимия и микробиология процесса анаэробного сбраживания

В биореакторах происходит распад органического вещества. Значительная часть компонентов переходит в газ и в раствор. Брожение называется метановым, так как одним из основных конечных продуктов распада органических веществ является метан. Основные пути процесса анаэробной переработки органических отходов показаны на рис. 15.1.

Общая схема метанового брожения предложена Баркером. Он рассматривал весь процесс, состоящий из двух фаз. В первой фазе (кислое или водородное брожение) из сложных органических веществ с участием воды образуются кислоты (уксусная, муравьиная, молочная, масляная, пропионовая и др.), спирты (этиловый, пропиловый, бутиловый и др.), газы (углекислый, водород, сероводород, аммиак), аминокислоты, глицерин и др. Этот распад осуществляют обычные сапрофитные анаэробные бактерии, которые широко распространены в природе, быстро размножаются и живут при  $pH$  среды 4,5–7. Кислое брожение характеризуется обильным образованием и выделением кислот, что сопровождается подкислением среды и снижением  $pH$  до 5–4,5, а также появлением неприятного гнилостного запаха.





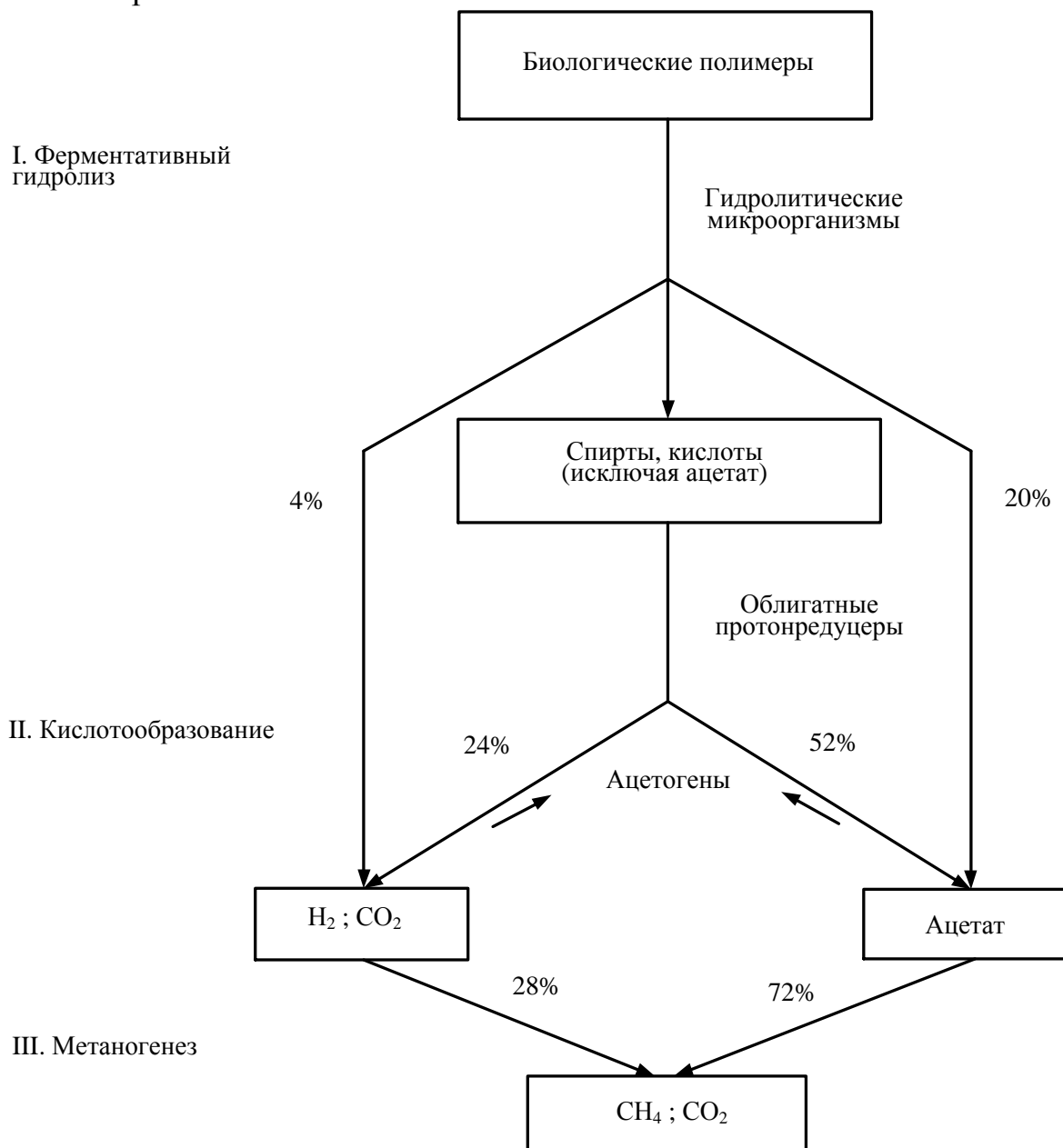
**Рис. 15.1. Основные пути процесса анаэробной переработки органических отходов**

Во второй фазе (щелочное или метановое брожение) метанообразующие бактерии осуществляют дальнейшее разложение веществ, образовавшихся в первой фазе. При этом выделяется газ, состоящий из метана, углекислого газа, водорода и азота.

Схема Баркера не имеет строгой термодинамической основы. Однако представление о двух фазах процесса достаточно удобно для ведения технологического контроля, и этим широко пользуются на практике.

Другие исследователи считают, что в анаэробном разрушении органического вещества следует выделить три стадии и выделяют три физиологические

группы бактерий. Маккарти в 1964 г. представил схему с потоками субстратов, которой пользуются в наше время. С некоторыми изменениями эта схема представлена на рис. 15.2.



**Рис. 15.2. Три стадии анаэробного распада органического вещества и процентный переход энергосодержания сложных органических веществ в метан на каждой стадии, представленные в виде данных о химическом потреблении кислорода**

На первой стадии гетерогенная группа анаэробных бактерий, так называемые «первичные» анаэробы, подвергают ферментативному гидролизу сложные многоуглеродные вещества, представляющие собой основные классы органических соединений – белки, липиды и полисахариды. При этом вместе с бактериями, осуществляющими гидролиз полимеров, функционируют микроорганизмы, которые расщепляют моносахара, органические кислоты, спирты и метанол. Результатом деятельности этих микроорганизмов является образование водорода, углекислого газа, низкомолекулярных жирных кислот и спиртов, а также некоторых других соединений. В этой стадии участвуют облигатные

анаэробные бактерии: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyrivibrio*, а также факультативные: *Escherichia coli* и *Bacillus sp.*

На второй стадии ацетогенные микроорганизмы, такие, как *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Desulfovibrio*, ферментируют  $H_2$  и  $CO_2$  и другие одноуглеродные соединения, а также некоторые более сложные вещества в низкомолекулярные органические кислоты через промежуточное образование ацетил-КоА. Реакции проходят по следующим уравнениям.

Окисление органических кислот:

а) молочной



б) пропионовой



в) масляной



Окисление спиртов, например этанола



На этой стадии действуют ацетогенные бактерии, включая как облигатные, так и факультативные виды, способные сбрасывать органические кислоты и нейтральные соединения до водорода и уксусной кислоты, и гомоацетогенные бактерии, способные сбрасывать одно- и многоуглеродсодержащие соединения только до уксусной кислоты.

Распад органического вещества на последней стадии осуществляется метанобразующими и сульфатредуцирующими микроорганизмами, которые используют метаболиты, образующиеся на первых стадиях. На заключительном этапе анаэробного разрушения органического вещества в экосистемах с низким содержанием сульфатов образуются главным образом  $CH_4$  и  $CO_2$  и незначительное количество  $H_2S$ . В естественных экосистемах сульфатвосстанавливающие бактерии являются донорами  $H_2$  для метаногенов. При повышении концентрации сульфатов до 0,5 ммоль/л сульфатвосстанавливающие бактерии становятся конкурентоспособными с метаногенами за энергетические субстраты ( $H_2$  и ацетат), так как образующиеся сульфиды ингибируют рост метаногенов.

Метаногенные бактерии являются строгими анаэробами, поэтому присутствие в биореакторе кислорода и значительного количества ионов нитратов может препятствовать выделению метана. Анаэробные условия в биореакторе создаются при потреблении кислорода факультативными анаэробными бактериями (*E. coli* и др.), снижение окислительно-восстановительного потенциала способствует образованию сульфидов и водорода. Однако некоторые метаногены способны сохранять жизнеспособность при кратковременном наличии кислорода.

Подавляющее большинство метаногенов достигают максимальной скорости роста при температуре 30–40 °С. Имеются также термофильные виды с оптимумом температуры от 50 до 85 °С. Большинство представителей метанобра-

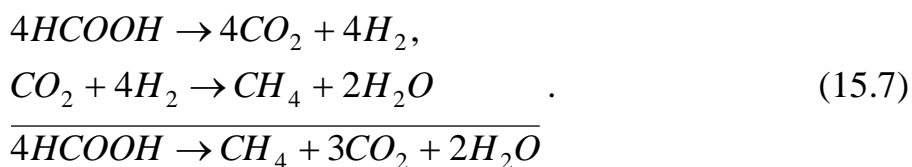
зующих бактерий растут в средах с  $pH$ , близким к нейтральному (от 6,5 до 7,5).

Источниками углерода и энергии для метаногенов обычно является смесь водорода и углекислого газа. Некоторые бактерии используют эту смесь как единственный субстрат роста ( $-139,2$  кДж/моль  $CH_4$ )



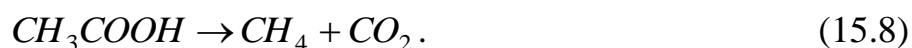
При этом клетки используют одновременно газообразный водород и водород, входящий в состав молекул воды.

Следующим потенциально используемым источником углерода и энергии у метаногенов является формиат. На первом этапе формиат разлагается до  $CO_2$  и  $H_2$ , затем  $CO_2$  восстанавливается до  $CH_4$  ( $-130$  кДж/моль  $CH_4$ )



Имеются также данные о том, что формиат может включаться в процесс метаногенеза прямым путем без образования  $H_2$  и  $CO_2$ .

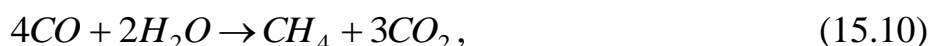
Более важным субстратом для метаногенеза является ацетат. Количество  $CH_4$ , образующегося из ацетата в биореакторе, по некоторым данным, составляет 72 % ( $-31$  кДж/моль  $CH_4$ )



Брожение метанола с образованием  $CH_4$  проходит в реакции дисмутации, в течение которой одна молекула утилизируемого субстрата окисляется до муравьиной кислоты, другая – восстанавливается до  $CH_4$  и  $H_2$ . Образующиеся затем муравьиная кислота и  $H_2$  снова включаются в цепь синтеза метана. Конечный процесс описывается уравнением ( $-105,0$  кДж/моль  $CH_4$  при  $pH = 7$ )



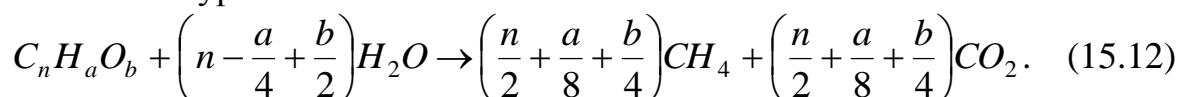
Ряд видов бактерий образуют метан из окиси углерода ( $-185,1$  кДж/моль  $CH_4$  при  $pH = 7$ )



или



В биореакторах при нормальном ходе процесса все группы микроорганизмов действуют согласованно. Все промежуточные продукты распада одной стадии перерабатываются бактериями другой стадии. В общем случае в процессе разложения органического вещества количество конечных продуктов можно получить согласно уравнению



В каждом конкретном случае выход биогаза зависит от состава органического вещества, условий процесса и т. д. Например, из глюкозы получается следующее количество конечных продуктов:  $1,0 \text{ г } C_6H_{12}O_6 \rightarrow 0,25 \text{ г } CH_4 +$

+ 0,69 г  $CO_2$  + 0,06 г клеточной массы + 632 кДж энергии, или из 1 моля  $C_6H_{12}O_6$  можно получить 2,8 моля  $CH_4$  и 2,6 моля  $CO_2$ .

### 15.3. Факторы, влияющие на процесс анаэробного сбраживания

#### 15.3.1. Свойства сырья

Состав сырья и его свойства оказывают сильное влияние на нормальный ход процесса, на выход биогаза. К таким свойствам сырья относятся: содержание и состав органического вещества, наличие питательных элементов, свежесть, содержание твердых частиц и др.

Если органические отходы сельскохозяйственного производства хранятся длительное время в благоприятных для жизнедеятельности аэробных или анаэробных микроорганизмов условиях, изменяются их состав и свойства. При разложении СОВ увеличивается содержание кислот, изменяется  $pH$  среды. Характерным показателем является содержание летучих жирных кислот (ЛЖК). Большое содержание ЛЖК свидетельствует о том, что исходное сырье для процесса анаэробной переработки уже не свежее. Такое сырье при загрузке в биореактор оказывает неблагоприятное воздействие на процесс – понижает  $pH$  среды биореактора, изменяет оптимальное соотношение микроорганизмов в биореакторе, вследствие чего нормальный ход процесса может нарушаться.

Данные разных исследователей о выделении биогаза при разложении трех основных групп органического вещества: жиров, углеводов и белков – несколько различаются (табл. 15.2). Предлагается следующая формула для определения сбраживания

$$a = 0,92ж + 0,62у + 0,34б, \quad (15.13)$$

где  $ж$ ,  $у$ ,  $б$  – содержание жиров, углеводов и белков на 1 г СОВ органического вещества (коэффициенты означают удельный выход газа, л/г, загружаемых в биореактор жиров, белков и углеводов).

Таблица 15.2

**Выход биогаза при метановом сбраживании жиров, углеводов и белков**

Компонент	Выход биогаза, м <sup>3</sup> /кг	Содержание метана, %
Углеводы	0,790–0,886	50
Жиры	1,120–1,535	62–72
Белки	0,585–0,750	71–84

От пропорций углеводов, жиров и белков в отходах зависит выход биогаза в конкретном случае. Новейшие исследования показывают большое влияние состава кормов на выход экскрементов и биогаза.

При метановом брожении одним из наиболее важных факторов является соотношение  $C:N$  в ассимилируемой части субстрата. Если соотношение  $C:N$  в навозе чрезмерно велико, то недостаток азота будет служить фактором,

ограничивающим процесс метанового брожения. Если указанное соотношение чрезмерно мало, то образуется такое большое количество аммиака, что он становится токсичным для бактерий. В процессе метанового брожения соотношение  $C:N$  постоянно меняется, так как углерод выделяется с биогазом постоянно, а азот сохраняется в биореакторе и выходит только при выгрузке шлама. Соотношение  $C:N$  в сельскохозяйственных отходах, поступающих на переработку, в среднем следующее: у свиного навоза – 6,2–13,4; у навоза крупного рогатого скота – 9–15; у птичьего помета – 7–15; у лошадиного навоза – 25.

### ***15.3.2. Температура процесса***

Температура – один из важнейших факторов процесса метанового брожения. В природе метан образуется при широком диапазоне температур – от 0 до 97 °С. Обычно выделяют три температурные зоны жизнедеятельности бактерий: психрофильная, мезофильная и термофильная. Большинство исследователей придерживаются следующего разделения зон температур: психрофильная зона – до 20 °С, мезофильная – 20–40 °С, термофильная – 50–60 °С. Принято, что в каждой зоне брожение осуществляет своя специфическая ассоциация микроорганизмов.

Большая часть лабораторных, полупроизводственных и производственных исследований была выполнена для мезофильного режима и лишь немногие – для термофильного. Это объясняется тем, что сбраживание отходов в термофильном режиме температур считалось неэкономным из-за высокой потребности в энергии и обычного представления о нестабильности эксплуатации биореакторов при высоких температурах. В последнее время появились сообщения о более широком использовании термофильного процесса, так как он обуславливает более высокую скорость распада органического вещества, более высокую продукцию биогаза и наименее вреден для окружающей среды.

Сведения относительно оптимального режима температуры, необходимого для процесса метанового брожения, различны. По некоторым данным оптимальная температура, при которой жизнедеятельность бактерий протекает более активно, для мезофильного процесса составляет 32–33 °С, для термофильного – 52–54 °С. Температура 35–42 °С считается слишком высокой для жизнедеятельности мезофильных метанобразующих бактерий и мало благоприятной для развития и роста термофильных.

### ***15.3.3. pH, буферные свойства среды в биореакторе***

В процессе анаэробного брожения можно выделить кислую и щелочную (метановую) фазы. В течение кислой фазы значение  $pH$  снижается вследствие образования летучих кислот. Это снижение обычно компенсируется расщеплением летучих кислот метанобразующими бактериями и соответствующим продуцированием бикарбонатов.

При нормальном ходе процесса жизнедеятельность разных групп бактерий обеих фаз протекает одинаково энергично и согласованно. Все промежу-

точные продукты распада кислой фазы перерабатываются бактериями щелочной фазы. При каких-либо нарушениях процесса вследствие перегрузки биореактора, резкого изменения температуры, наличия ингибиторов и других причин нарушается деятельность метановых бактерий, наиболее чувствительных к изменениям внешней среды. В таких случаях в биореакторе наблюдается увеличение количества продуктов кислой фазы. Это свидетельствует о «закисании» биореактора, когда буферная емкость будет испорчена и снизится  $pH$ . Для восстановления нормального хода процесса необходимо устранить причину возмущения и добавить щелочь, в первую очередь бикарбонат натрия.

Оптимальные значения  $pH$ , необходимые для процесса метанового брожения, по данным различных исследователей находятся в диапазоне 6,5–8,0. Оптимальным значением щелочности считают 1 500–5 000 мг  $CaCO_3$ /л субстрата в зависимости от состава сырья.

#### 15.3.4. Доза загрузки

Доза загрузки – это величина загружаемого в биореактор свежего сырья в определенный интервал времени, обычно в сутки. Дозу загрузки, %, можно выразить как отношение объема загружаемого сырья к объему сырья в биореакторе

$$D = \frac{V_{zc}}{V_{cb}} 100, \quad (15.14)$$

где  $V_{cb}$  – объем сырья в биореакторе;

$V_{zc}$  – объем загружаемого сырья в сутки.

Но такое определение дозы загрузки не дает полного представления о сырье. Им удобно пользоваться, когда сырье одинаково по составу и содержанию. Наиболее полное представление о сырье дает определение дозы загрузки по содержанию СОВ в исходном сырье. Дозы загрузки по объему и содержанию СОВ, а также по содержанию СВ взаимосвязаны. Пересчет одной величины в другую требует знания влажности  $W$  и зольности  $A$  поступающей в биореактор массы и проводят его по формуле

$$D_{COB} = \frac{D(100 - W)(100 - A)}{100}. \quad (15.15)$$

Многими экспериментальными исследованиями установлено, что от дозы загрузки исходного сырья в биореакторы в большой мере зависит эффективность процесса метанового сбраживания, степень разложения органических веществ, содержащихся в нем объемы получаемого биогаза и биореактора и, следовательно, величина капитальных и эксплуатационных затрат.

Оптимальные дозы загрузки, кг СОВ/м<sup>3</sup> СБ в сут, для процессов метанового брожения при мезофильных температурах для разного сырья следующие: навоз КРС – 6,0; свиной навоз – 3,0–4,9; куриный помет – 1,5–2,4.

### 15.3.5. Продолжительность брожения

Продолжительность сбраживания в большой мере зависит от дозы загрузки и температуры процесса. При определении продолжительности сбраживания пользуются термином время оборота биореактора.

**Время оборота биореактора (ВОБ)** – это время, в течение которого в биореактор загружают свежее сырье и выгружают из него переброженное сырье, равное объему сырья в биореакторе. В идеальном случае за это время загруженное сырье полностью заменяет переброженное. В приблизительных расчетах можно использовать следующую формулу

$$ВОБ = \frac{V_{сб.}}{V_{зс}}. \quad (15.16)$$

В процессе метанового брожения выделяется биогаз и, следовательно, объем сырья в биореакторе несколько уменьшается, поэтому ежедневно в биореактор на эту величину загружается сырья больше, чем выгружается. При выборе оптимального ВОБ в целях оптимизации процесса важно, чтобы суточная убыль микроорганизмов при выгрузке из биореактора переработанного сырья не превышала суточного прироста микрофлоры.

Оптимальная продолжительность сбраживания зависит также от состава загружаемого органического вещества, степени его разложения и концентрации СОВ в биореакторе, а также экономических соображений. Для различных отходов при различных дозах загрузки и температуре предусмотрены разные ВОБ: навоз КРС – 15 сут, свиной навоз – 10–15 сут, куриный помет – 15–16 сут. Для сбраживания отходов сельскохозяйственной продукции, которые предусмотрено использовать как удобрение, нецелесообразно длительное ВОБ, так как максимальная степень разложения органического вещества не обязательна, а достаточно достижения максимальной степени снятия органического загрязнения.

На практике ВОБ выбирают в зависимости от температуры, степени разложения и состава сырья в следующих интервалах: при 10–25 °С – до 30 сут, при 25–45 °С – от 10 до 20 сут, при 45–60 °С – от 8 до 4 сут.

### 15.3.6. Перемешивание

На процесс метанового брожения органического вещества влияет применение или отсутствие перемешивания и его интенсивность. Применение процесса перемешивания в биореакторе позволяет:

- а) поддерживать однородность распределения загружаемого сырья и постоянный контакт его с микроорганизмами, что дает возможность максимально утилизировать свежие питательные вещества;
- б) сохранять на низком уровне концентрацию продуктов распада, так как они равномерно распределяются по всему объему;
- в) обеспечивать однородность среды как по температуре, так и по концентрации питательных элементов, что создает наилучшие условия жизнедеятельности бактерий;



- г) устранять концентрацию ингибирующих веществ в какой-то отдельной зоне биореактора, что ограничивает их влияние на процесс метанового брожения;
- д) предотвратить образование корки или разбивание ее на поверхности, а также образование неподвижного густого осадка на дне;
- е) уменьшать количество участков в биореакторе, в которых могут содержаться неподвижные неразложившиеся вещества и отработанная жидкость.

Проводились эксперименты по влиянию перемешивания на процесс метанового брожения, по интенсивности перемешивания, но результаты не всегда были убедительными. Таким образом, влияние перемешивания на интенсивность метанового брожения заключается в обеспечении гомогенности содержимого в биореакторе и десорбции биогаза.

### 15.3.7. Ингибиторы процесса

Имеется много органических веществ, которые в растворенном состоянии могут проявлять либо стимулирующее действие, либо токсичное. Например, азот аммиака в концентрациях 50–200 мг/л влияет положительно на процесс метанового брожения, а в концентрациях 200–1 000 мг/л – не оказывает определенного влияния и при более высоких концентрациях является ингибитором процесса. Считается, что невозможно использовать птичий помет и свиной навоз в высоких дозах загрузки, особенно в термофильном режиме из-за больших концентраций азота аммиака.

Процесс метанового брожения может быть ингибирован также высокой концентрацией тяжелых, щелочных, щелочно-земельных металлов, сульфидов, кислорода, антибиотиков, дезинфицирующих средств. Токсичность тяжелых металлов (за исключением хрома) может быть предотвращена или исключена осаждением их в виде сульфидов. Использование осаждения тяжелых металлов в виде сульфидов для их удаления обусловлено практически полной нерастворимостью сульфидов тяжелых металлов. В качестве источника сульфидов рекомендуется использовать  $FeSO_4$ . Сульфиды будут образовываться при биологическом восстановлении сульфатов и выводиться из раствора ионами железа. Растворенные сульфиды в концентрации более 200 мг/л обладают токсичным действием на процесс метанового брожения. Высокая концентрация растворенных сульфидов может быть снижена путем добавления солей железа.

Уже при небольших концентрациях ингибирующее действие оказывают также соединения  $CaCl_4$ ,  $CHCl_2$ ,  $CH_2Cl_2$  и  $CN^-$ , а такие соединения, как формальдегид,  $SO_2$  и  $H_2S$ , становятся токсичными при более высокой их концентрации.

Одним из основных условий эффективной эксплуатации биореакторов является исключение возможности доступа в них кислорода, так как, оказавшись в среде, содержащей кислород в концентрациях выше 0,1 %, метанообразующие бактерии быстро утрачивают свою жизнеспособность. На практике соблюдать такие строго анаэробные условия сложно. Небольшие количества воз-

духа (до 1 % от объема шлама) в биореакторе не оказывают отрицательного воздействия на процесс метанового брожения. Исследования воздействия продувания воздухом на процесс метанового брожения в биореакторах периодического действия небольшого объема показали, что процесс образования  $CH_4$  после воздействия кислородом резко изменяется, но нормализуется спустя 24 ч.

### **Вопросы к главе 15**

1. Сырье для производства биогаза.
2. Биохимия и микробиология процесса анаэробного сбраживания.
3. Факторы, влияющие на процесс анаэробного сбраживания.

## 16. Биоэнергетические установки

### 16.1. Основные узлы и системы биореакторов

Современные биоэнергетические установки состоят из следующих основных систем:

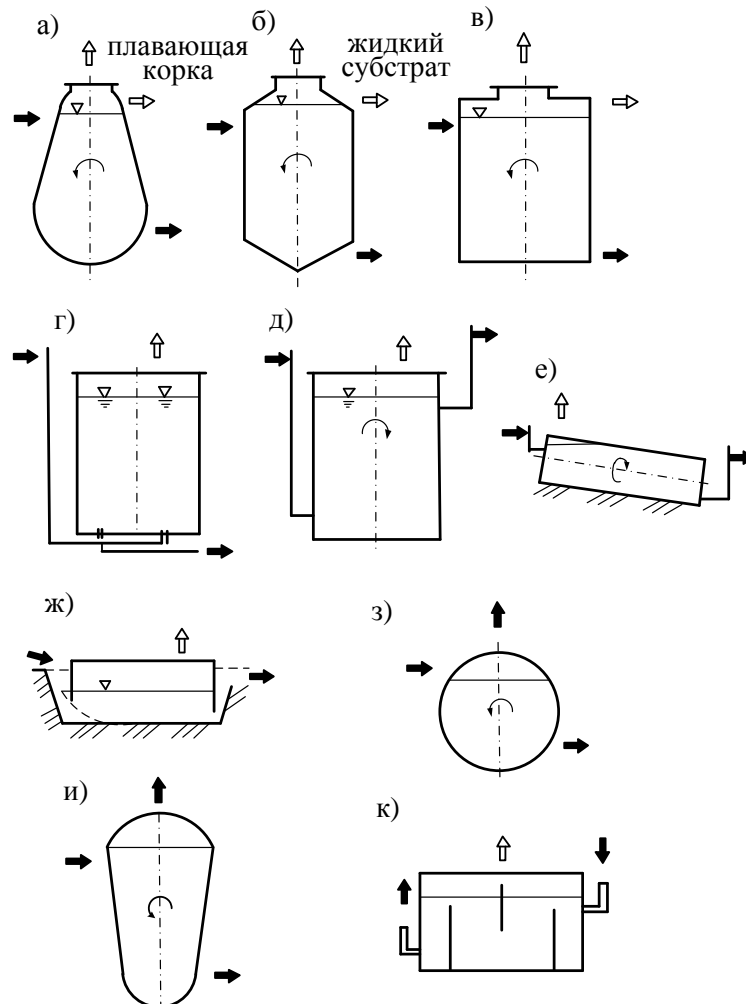
- а) система подготовки и подачи сырья в биореактор;
- б) биореактор (метантенк) с системой поддержания постоянной температуры и другими комплектующими устройствами;
- в) система хранения и использования биогаза;
- г) система выгрузки и транспортировки сброженного шлама.

Самая ответственная составная часть установки – биореактор, от его конструкции главным образом зависит, какие должны быть комплектующие системы. В настоящее время известны биореакторы различных конструкций (рис. 16.1).

С точки зрения прочности, создания условий для перемещения жидкого субстрата (затрат энергии на перемешивание), отвода осадков и разрушения плавающей корки предпочтительным представляется использование яйцеобразного биореактора (рис. 16.1, а, з). Однако из-за трудностей в изготовлении крупные установки делаются цилиндрической формы из бетона или металла. Преимуществами цилиндрического резервуара с конусной верхней или нижней частью (рис. 16.1, б) являются: наличие небольшого пространства для накопления газа, концентрация плавающей корки в ограниченном объеме, обеспечение хорошего отвода шлама. Резервуары такой формы используются в коммунальных установках для очистки стоков. Цилиндрический резервуар (рис. 16.1, в) по сравнению с резервуарами вышеописанных форм создает худшие условия для перемешивания субстрата и из-за большой поверхности контакта сред требует более высоких затрат на удаление осадка и разрушение плавающей корки, что связано с увеличением расхода энергии на перемешивание. К его преимуществам можно отнести относительно простую технологию изготовления, использующую опыт строительства емкостей для сельскохозяйственных целей. Цилиндрический резервуар можно разделить на две или несколько камер (рис. 16.1, г). При такой компоновке не только отпадает необходимость в теплоизоляции наружных стенок резервуара, но и улучшается теплопередача между обеими камерами через перегородку, выполненную из теплопроводного материала. Вмонтированное в эту перегородку нагревательное устройство дает дополнительные конструктивные и энергетические преимущества. Биореактор может быть кубической формы (рис. 16.1, д). Такой реактор можно также разделить на две части: главную бродильную камеру и камеру для окончательного этапа сбраживания и осаждения шлама.

Установки этого типа не позволяют получать высокую степень разложения субстрата, так как в них не обеспечивается ни равномерное перемешивание массы, ни управление загрузкой рабочего объема реактора и временем пребывания массы в реакторе, что необходимо для максимального выхода газа. Разрушение плавающей корки и осадка связано с большими экономическими затратами. В горизонтальном резервуаре (рис. 16.1, е) субстрат перемещается в

продольном направлении. Наклонное расположение продольной оси резервуара облегчает стекание шлама по направлению к выгрузному отверстию. Такая конструкция удобна для размещения простейшего перемешивающего механизма. Биореактор в виде вырытой в грунте траншеи (рис. 16.1, ж) позволяет обрабатывать большие количества субстрата. В качестве строительного материала используют, как правило, бетон. Наиболее прост в изготовлении и эксплуатации биореактор цилиндрической формы, установленный горизонтально (рис. 16.1, к). Всю емкость можно разделить на несколько камер, исключив тем самым возможность контакта свежего навоза с выгружаемым шламом, что очень важно для защиты окружающей среды.



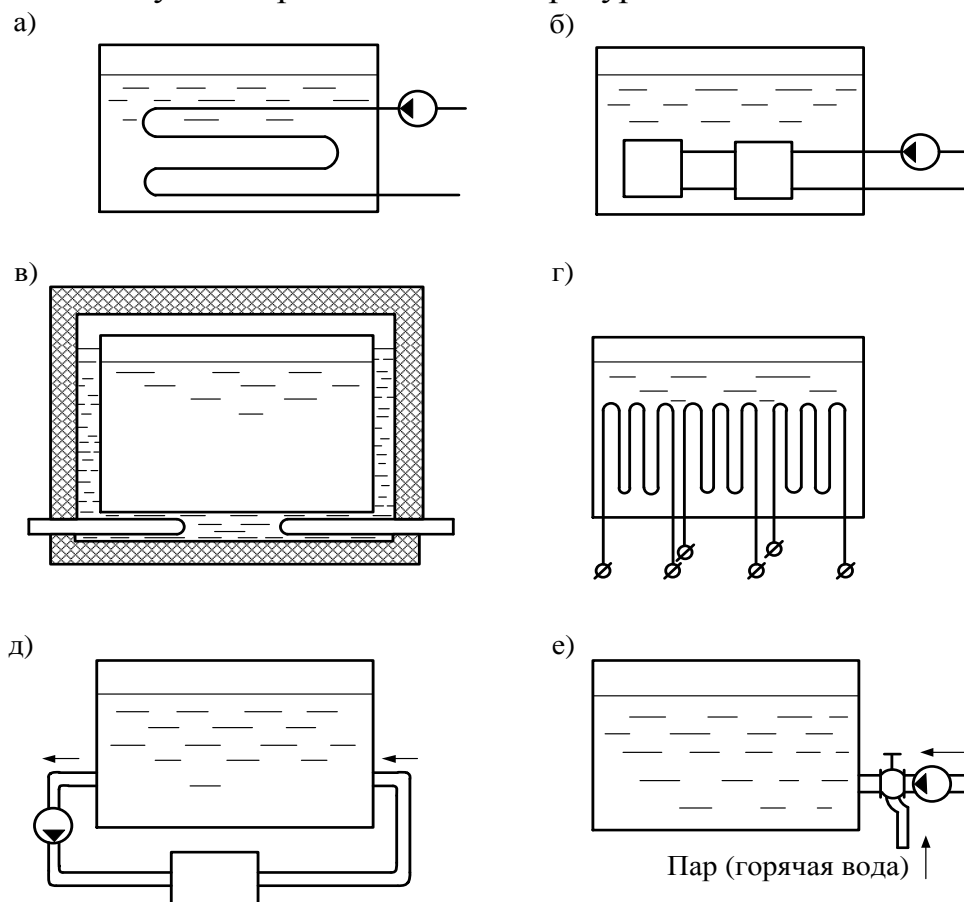
**Рис. 16.1. Конструктивные формы биореакторов:**

- а – яйцеобразная с расширенным дном; б – цилиндрическая вертикальная с коническим днищем; в – цилиндрическая вертикальная с загрузкой и выгрузкой из верхней зоны;
- г – цилиндрическая вертикальная с загрузкой и выгрузкой из нижней зоны;
- д – цилиндрическая вертикальная двухсекционная с загрузкой в нижней зоне и выгрузкой из верхней зоны второй секции; е – цилиндрическая горизонтальная с наклоном;
- ж – траншейная с плавающим покрытием; з – шарообразная; и – яйцеобразная с расширенной верхней частью; к – горизонтальная секционная

Чтобы получить необходимую для процесса брожения температуру и по возможности поддерживать ее на постоянном уровне, следует прежде всего подогревать подаваемый в реактор субстрат до нужной температуры. Дополнительный подвод тепла необходим для компенсации тепловых потерь. Посколь-

ку перепады температуры отрицательно влияют на ход биологического процесса, необходимо сочетать подвод тепла с интенсивным перемешиванием.

В качестве нагревательных элементов чаще всего применяют трубчатые теплообменники расположенные внутри реактора в виде змеевика (рис. 16.2, а). Теплоносителем служит горячая вода температурой около 60 °С.



**Рис. 16.2. Способы обогрева биореактора:**

- а – горячей водой по змеевику; б – горячей водой с помощью секций радиаторов;  
 в – с помощью рубашки горячей воды, подогреваемой электронагревателями; г – электрическими теплопроводами; д – подогрев субстрата в теплообменнике вне биореактора;  
 е – подогрев подаваемого в биореактор субстрата острым паром или горячей водой

Для небольших реакторов с перемешивающими устройствами можно использовать теплообменные нагревательные элементы (цилиндрические или плоские теплообменники), через которые прокачивают горячую воду и которые можно вынимать из реактора при его очистке (рис. 16.2, б).

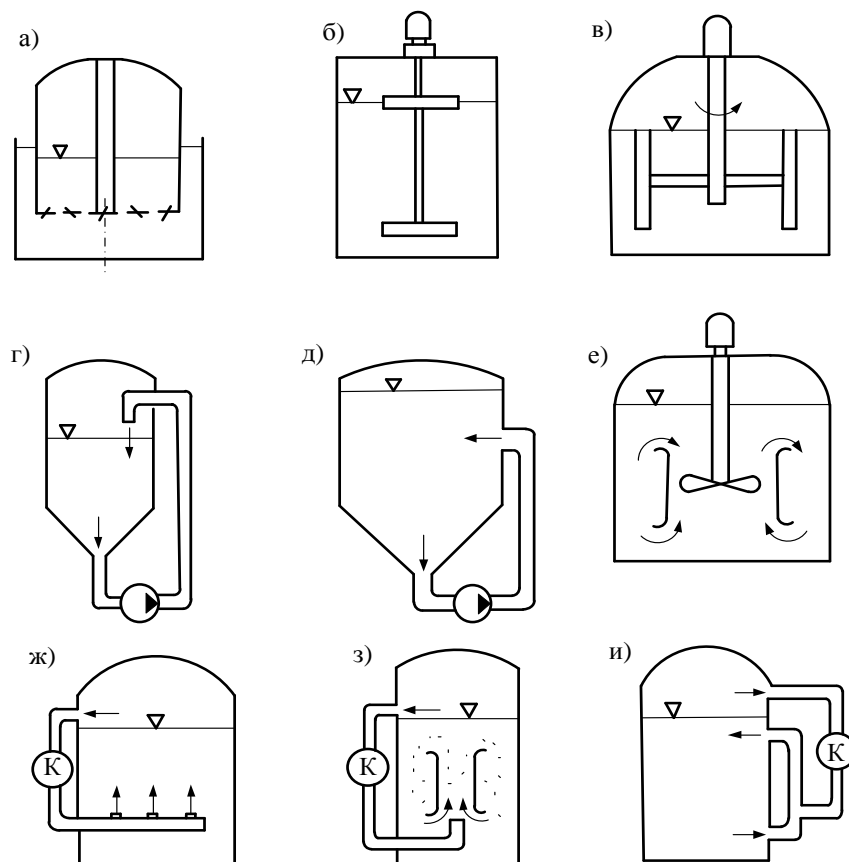
Электрообогрев (рис. 16.2, в, г) требует много электроэнергии и может быть использован только для небольших биореакторов.

Нагреватели, встроенные в стенки реактора, целесообразно применять лишь в том случае, если они могут передавать тепло субстрата с обеих сторон стенки, как это происходит в двухкамерном реакторе с внутренней перегородкой. Подогрев субстрата можно осуществлять, непосредственно подавая в него горячую воду или пар (рис. 16.2, е).

Равномерную передачу тепла субстрата можно обеспечить с помощью теплообменников, расположенных вне реактора (рис. 16.2, д). Их применяют

только в сочетании с системой принудительной циркуляции субстрата, что позволяет надежно регулировать температуру брожения. Благодаря одновременному подогреву и перемешиванию свежего и циркулирующего субстрата разница между температурами поступающего в камеру и уже имеющегося в ней субстрата будет незначительной. Расположение теплообменников вне рабочего пространства реактора значительно облегчает обслуживание и ремонт.

Некоторые варианты перемешивания для вертикальных реакторов показаны на рис. 16.3.



**Рис. 16.3. Перемешивание в биореакторах:**

а – при передвижении газгольдера; б, в – механической мешалкой; г – насосом (выгрузка над коркой); д – насосом (выгрузка под коркой); е – механической мешалкой и струями жидкости; ж – биогазом; з – биогазом и циркуляцией жидкости; и – биогазом и жидкостью

В биореакторе-газгольдере (рис. 16.3, а) с плавающей верхней газовой частью перемешивание осуществляют с помощью прикрепленных к подвижной части биореактора-газгольдера пластинок, расположенных под разными углами.

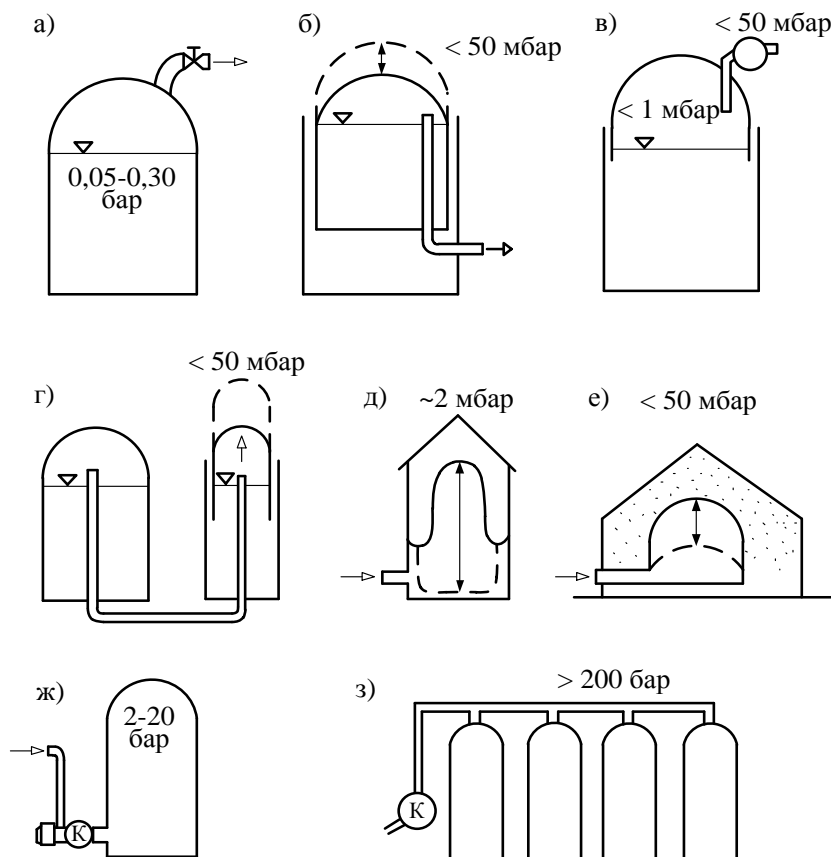
Мешалки (рис. 16.3, б, в) можно эффективно и с допустимым расходом энергии применять для работы небольших реакторов при использовании тяжелых субстратов.

Содержимое крупных реакторов, в особенности цилиндрической формы, можно перемешивать гидравлическим способом (рис. 16.3, г–е), т.е. при помощи струи жидкости.

Хорошего перемешивания можно добиться, нагнетая полученный в результате брожения газ в жидкий субстрат (рис. 16.3, ж–и). Однако при этом

субстрат не должен обладать слишком большой вязкостью и быть склонным к образованию плавающей корки, в противном случае следует постоянно удалять всплывающие частицы или отделять крупные частицы твердого материала от субстрата перед поступлением его в реактор.

Способ хранения биогаза зависит в первую очередь от того, для каких целей будет использован биогаз. Если предусмотрено прямое сжигание в горелках котлов или в газогенераторах, то большие газгольдеры не нужны. В этом случае они необходимы для выравнивания неравномерности газовыделения и улучшения тем самым условий горения. Некоторые способы сбора и хранения биогаза показаны на рис. 16.4.



**Рис. 16.4. Способы сбора и хранения биогаза:**

а – сбор и хранение биогаза в верхней части биореактора; б – сбор биогаза в плавающей верхней части биореактора-газгольдера; в – сбор биогаза в плавающей верхней части биореактора с автоматическим регулированием давления; г – сбор и хранение биогаза в верхней части биореактора и в газгольдере с плавающей верхней частью («мокром»); д – сбор и хранение биогаза в надувном газгольдере («мешке»); е – сбор и хранение биогаза в надуваемом газгольдере под весом другого материала; ж – заполнение биогаза для хранения в емкости с помощью компрессора; з – хранение биогаза в емкостях под высоким давлением

При небольшом давлении биогаз можно собирать и хранить в биореакторах с колоколообразной и перемещающейся верхней частью (рис. 16.4, а–г), а также в газгольдерах, в которых под давлением биогаза увеличивается объем (рис. 16.4, г–е). В промышленных установках в целях уменьшения объемов газгольдеров биогаз в газгольдер поступает при помощи компрессора (рис. 16.4, ж, з).

В целях интенсификации процесса брожения и получения биогаза с наиболее высоким содержанием  $CH_4$  навоз перед загрузкой в биореактор подлежит подготовке. Лучшие результаты получаются при подготовке навоза с помощью контактного нагрева уходящими газами от топки котла. Для этого навоз из свинарников собирают в приемный резервуар, далее при помощи насоса перекачивают в емкость для подготовки. После чего вакуумным насосом уходящие газы просасываются через массу, отдавая свое тепло. Навоз в емкости подогревают до температуры 54–55 °С. Кроме подогрева газы перемешивают массу. Для отделения крупных предметов в целях предотвращения засорения навозопроводов и насосов в резервуаре перед заполнением в насос устанавливают сито.

Известны различные способы выгрузки шлама. Обычно используется один из наиболее простых способов – перелив. При подаче свежего навоза уровень шлама в биореакторе поднимается и через переливную трубу шлам выгружается в емкость для его сбора.

## 16.2. Установки для производства биогаза

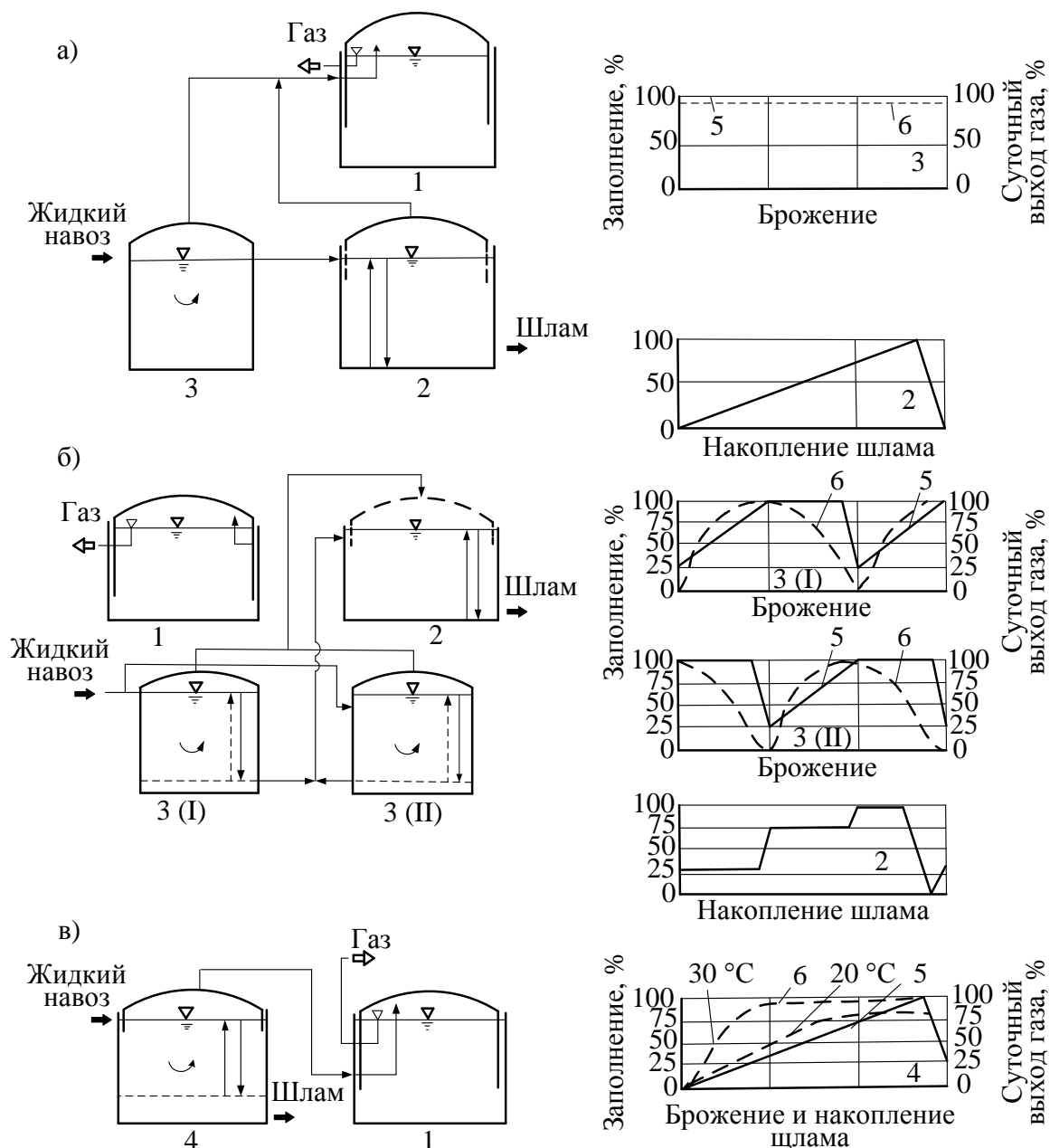
Существует несколько систем получения биогаза: проточная, с попеременным использованием реакторов, с накоплением газа и шлама (рис. 16.5).

В проточной системе (рис. 16.5, а) субстрат загружают в реактор непрерывно или через короткие отрезки времени (например, ежесуточно), удаляя соответствующий объем шлама. При оптимальных условиях (загрузка навоза, температура брожения и др.) проточная система позволяет получить максимальный выход газа.

При попеременном использовании (рис. 16.5, б) реакторов процесс прерывистый и протекает не менее чем в двух одинаковых по размерам и форме реакторах. В случае ежесуточной загрузки свежего субстрата реакторы при образовании определенного количества шлама попеременно заполняют свежим субстратом и по истечении заданного срока брожения опорожняют так, что в них остается только затравочный шлам. Эта система требует большего рабочего объема, чем проточная. Наличие газгольдера обязательно.

Система с накоплением газа и шлама (рис. 16.5, в) предусматривает только один жидкостный реактор, который является бродильной камерой и накапливает шлам до момента вывоза на поле. Поэтому реактор никогда не опорожняют полностью, остаток шлама служит закваской для новой порции субстрата. При непрерывной подаче свежего субстрата постоянно уменьшается количество времени, отводимого для брожения. В результате этого газовый потенциал накопившейся в реакторе массы используется не полностью.





**Рис. 16.5. Системы получения биогаза:**

а – проточная; б – с попеременным использованием реакторов; в – с накоплением газа и шлама; 1 – газгольдер; 2 – накопитель шлама; 3 – биореактор; 4 – камера для брожения и накопления шлама; 5 – заполнение; 6 – суточный выход газа

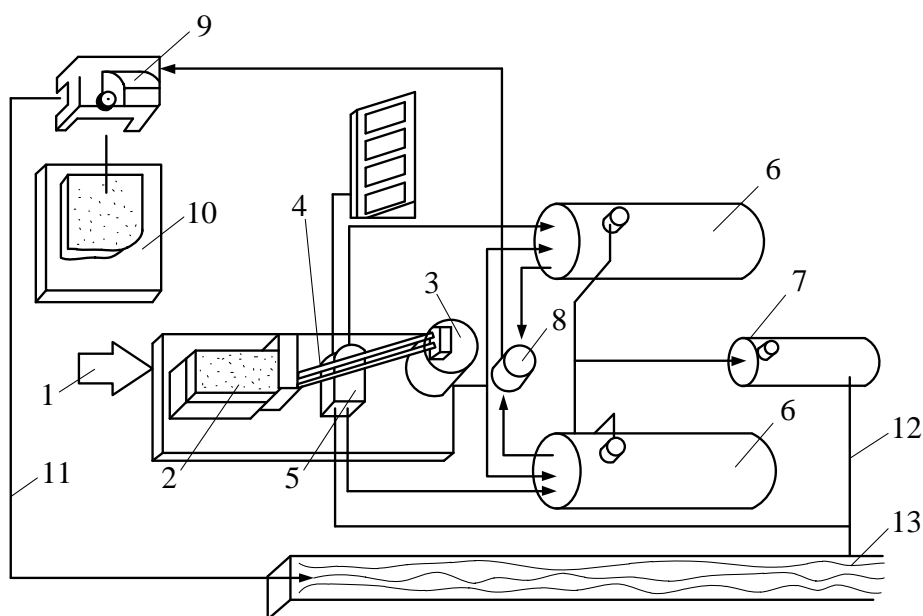
В настоящее время созданы промышленные биогазовые установки. Технологическая схема установки по переработке навоза в биогаз и кормовые добавки представлена на рис. 16.6.

### 16.3. Эксплуатация биоэнергетических установок

Наиболее важным при эксплуатации биоэнергетических установок является процесс пуска. Процесс пуска биореактора – это период, когда в биореакторе создается ассоциация микроорганизмов, способных к постоянному осуществлению конверсии органического вещества с образованием биогаза.

Существуют следующие основные методы пуска:

- а) введение в биореактор активной закваски из нормально действующего биореактора;
- б) добавление реагентов (извести, углекислого аммония, щелочей и т.д.), обеспечивающих оптимальные условия жизнедеятельности анаэробной микрофлоры;
- в) заполнение биореакторов свежими навозными стоками, которые содержат анаэробные микроорганизмы, в том числе и метанобразующие;
- г) заполнение биореакторов теплой водой и постепенное добавление в нее навозных стоков;
- д) заполнение биореактора горячими газами и постепенная загрузка навозных стоков;
- е) заполнение определенной части объема биореактора навозными стоками, поддержание неглубокого вакуума и постепенное добавление свежих навозных стоков.



**Рис. 16.6. Технологическая схема установки по переработке навоза в биогаз и кормовые добавки:**

- 1 – поступление твердого навоза из откормочных предприятий; 2 – расходный склад навоза; 3 – резервуар-накопитель для приготовления навозных стоков; 4 – конвейерная установка; 5 – водонагреватель; 6 – метантенк; 7 – газгольдер; 8 – резервуар для жидкого осадка; 9 – центрифуга; 10 – площадка для сушки осадка; 11 – фугат; 12 – биогаз для использования; 13 – земельные сельскохозяйственные поля

Общим для всех методов пуска является поддержание по возможности оптимальных условий жизнедеятельности метанобразующих микроорганизмов. Метод а) является самым простым и эффективным. Количество добавляемой закваски может быть разным в зависимости от состава сырья. Так, например, для пуска биореакторов со свиным навозом в термофильном режиме (54 °С) в биореактор добавляют закваску из нормально действующего биореактора при 54°С и  $ВОВ = 5$  сут. , составляющую 5, 10, 20, 25, 30, 50% от содержания свежего навоза. Выделение биогаза начинается уже в первые сутки, однако при больших дозах (25-50 %) оно происходит более интенсивно уже в начале сбра-

живания по сравнению с таковым при малых дозах закваски (5–20 %). При дозе закваски 25 % процесс брожения начинается достаточно интенсивно и увеличения дозы закваски до 50 % не требуется.

Контроль за процессом метанового брожения необходимо вести постоянно с помощью контрольно-измерительных приборов и путем отбора и анализа проб. Управление процессом должно быть автоматизированным. О нарушении процесса ориентировочно можно судить по изменению  $pH$  в биореакторе и увеличению содержания  $CO_2$  в биогазе.

#### 16.4. Использование продуктов метанового брожения

В процессе метанового брожения сельскохозяйственных отходов получают два основных продукта – биогаз и переброженный шлам, которые можно использовать. К основным компонентам биогаза относятся  $CH_4$  и  $CO_2$ , соотношение которых зависит от исходного субстрата и характеристики процесса брожения (температуры, времени пребывания массы в реакторе, дозы загрузки рабочего пространства). Кроме этих компонентов биогаз содержит незначительные количества  $H_2$ ,  $H_2S$  и  $N_2$  (табл. 16.1).

Таблица 16.1

Состав и характеристика биогаза

Характеристика	Компоненты биогаза					Биогаз (60 % $CH_4$ + 40 % $CO_2$ )
	$N_2$	$CH_4$	$CO_2$	$H_2$	$H_2S$	
Объемная доля, %	$\leq 3$	55–70	26–44	1	1	100
Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>		35,8		10,8	22,8	21,5
Предел воспламеняемости, %		5–15		4–30	4–45	5–12
Температура воспламенения, °С		+65... +750		+585		+650... +750
Критическое давление, МПа		4,7	7,6	1,3	3,9	7,5–8,9
Критическая температура, °С		-82,5	+31,0	0,09	+100	-2,5
Нормальная плотность, г/л		0,72	1,98	31	1,54	1,2
Критическая плотность, г/л		102	468	0,07	349	320

Объемная теплота сгорания, температура воспламенения и предел воспламеняемости определяются в основном содержанием  $CH_4$ , поскольку незначительные количества  $H_2$ ,  $N_2$  и  $H_2S$  не влияют на эти показатели. Критические значения давления и температуры отдельных компонентов показывают, что сжижение биогаза нецелесообразно.

Наиболее простым способом является сжигание биогаза в газовых горелках, так как газ можно подводить к ним из резервуара под низким давлением. В этом случае для обеспечения газом в небольшом количестве может быть использован метантенк с плавающим перекрытием. Другой вариант – строительство метантенка с неподвижным перекрытием. Труба, по которой подается биогаз, соединяется с газгольдером с помощью запорного клапана, а на трубопроводе, соединяющем газгольдер и газовую горелку, устанавливают пламегаситель.

Более предпочтительным является использование биогаза в газовых двигателях. При этом часть топлива превращается в механическую или электрическую энергию, часть уносится вместе с охлаждающей водой и выхлопными газами. Если исходить из теплового баланса газового двигателя, то можно считать, что на полезную механическую работу расходуется 20–25 % тепла, вводимого в двигатель. Остальное тепло газа уносится с охлаждающей водой (30–38 %) и выхлопными газами (38–30 %).

От двигателя охлаждающая вода температурой 70–90 °С может быть направлена по циркуляционной системе в биореакторы или в систему водяного отопления и горячего водоснабжения. После охлаждения вода снова возвращается в двигатель. При такой системе почти все тепло охлаждающей воды может быть использовано, за исключением потерь в трубах (не превышают 10 %). От каждого 1 м<sup>3</sup> газа с теплотворностью 6 000 ккал можно получить 1 500–2 000 ккал тепла из системы охлаждения.

Научные исследования, эксперименты и производственный опыт показывают, что биогаз экономически целесообразно использовать в газозлектрогенераторах, при этом сжигание 1 м<sup>3</sup> биогаза позволяет выработать 1,6–2,3 кВт·ч электроэнергии. Эффективность такого способа утилизации биогаза повышается за счет рекуперации тепловой энергии, образующейся в технологической цепи, для обогрева метантенка.

Основными примесями в биогазе, получаемом при метановом сбраживании большинства отходов, являются двуокись углерода  $CO_2$  и сероводород  $H_2S$ . При использовании биогаза в качестве топлива в зависимости от соотношения количества воздуха и количества топлива в топливной смеси сероводород при окислении образует серную или сернистую кислоту. Обе кислоты вызывают сильную коррозию металла, поэтому необходима очистка биогаза от сероводорода перед использованием его в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. Двуокись углерода и сероводород удаляют из биогаза с помощью «мокрой» очистки, щелочной очистки, жидкостной абсорбции, сухой очистки в скруббере и напорной сепарации.

## Вопросы к главе 16

1. Основные узлы и системы биореакторов .
2. Установки для производства биогаза.
3. Эксплуатация биоэнергетических установок.
4. Использование продуктов метанового брожения.

## 17. Использование вторичных энергоресурсов

### 17.1. Классификация вторичных энергоресурсов

В общем случае под вторичными энергоресурсами (ВЭР) понимают химически связанную и физическую теплоту, потенциальную энергию избыточного давления, содержащуюся в продукции, отходах, побочных и промежуточных продуктах, которые образуются в энергетической или технологической установке, не используются в самой установке, но могут быть частично или полностью использованы для энергообеспечения других процессов, установок. Можно считать, что вторичные топливно-энергетические ресурсы – это топливно-энергетические ресурсы, полученные как отходы или побочные продукты производственного технологического процесса.

Общие энергетические отходы – это энергетический потенциал всех материальных потоков на выходе из технологической установки. Количественно общие энергетические отходы равны разности между энергией, поступающей в технологическую установку, и полезно используемой энергией. Общие энергетические отходы подразделяют на три потока:

- а) неизбежные потери энергии в технологическом агрегате;
- б) энергетические отходы внутреннего использования – энергетические отходы, которые могут быть возвращены обратно в технологический агрегат за счет регенерации или рециркуляции и в результате сокращают количество подведенной энергии в технологический агрегат;
- в) энергетические отходы внешнего использования – энергетические отходы, представляющие собой вторичные энергетические ресурсы.

Принципиальная схема использования энергетических ресурсов в установках источников ВЭР и распределения энергетических потоков при утилизации ВЭР показана на рис. 17.1.

Для характеристики вторичных энергоресурсов, пригодных для непосредственного использования без преобразования энергоносителя, применяются показатели: выход ВЭР, фактическое использование ВЭР (коэффициент потребления ВЭР), резерв утилизации, возможная и фактическая экономия топлива за счет ВЭР, коэффициент утилизации ВЭР.

**Выход ВЭР** – количество ВЭР, образующихся в процессе производства в данной технологической установке за единицу времени.

**Коэффициент выработки за счет ВЭР** – отношение фактической (планируемой) выработки к экономически целесообразной (возможной).

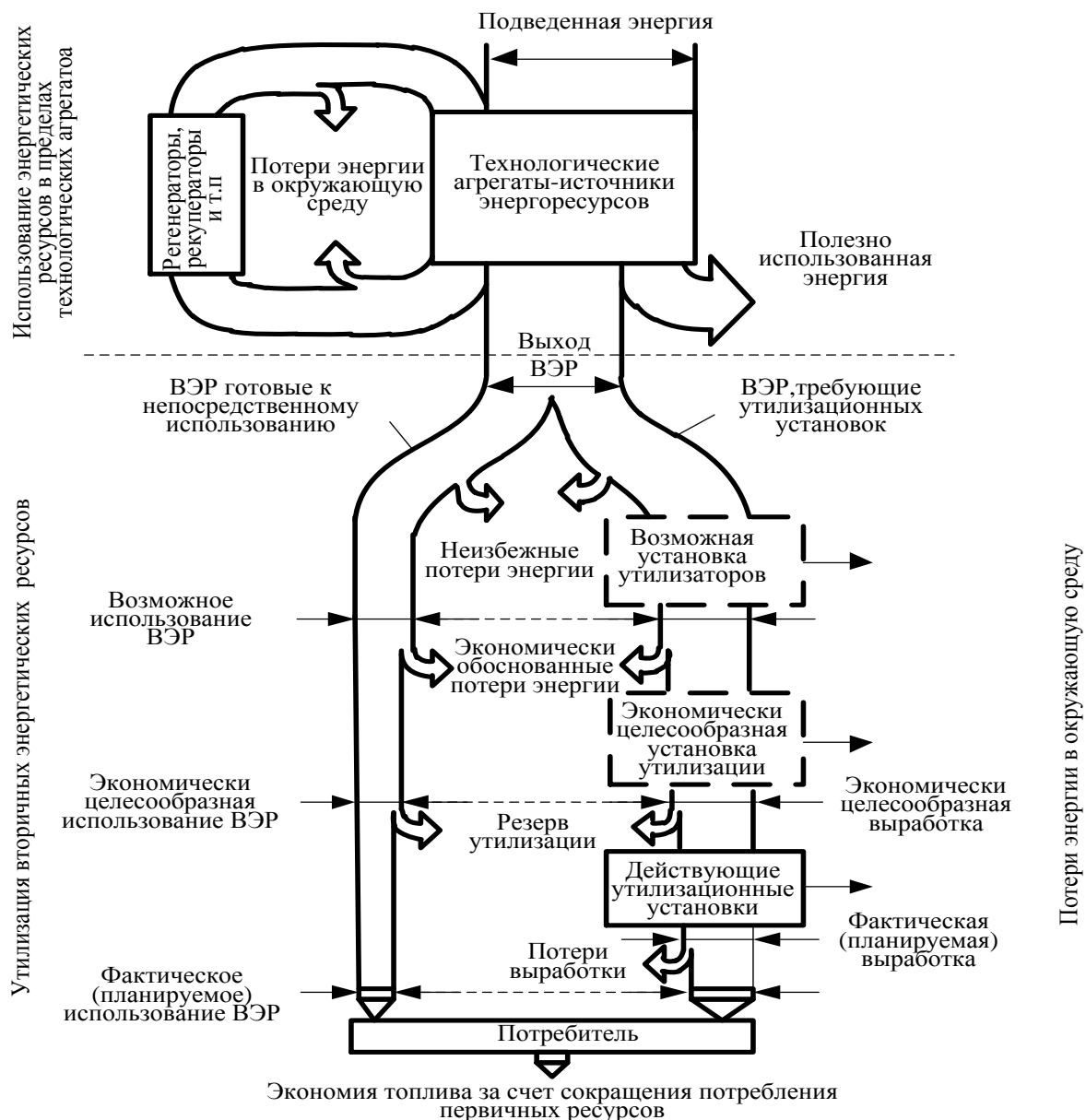
**Возможная** выработка энергии за счет ВЭР – это максимальное количество тепловой, электрической энергии или холода, которое практически может быть получено за счет данного ни да ВЭР при оснащении агрегата-источника ВЭР соответствующей утилизационной установкой с учетом режимов их работы.

**Фактическая** выработка энергии за счет ВЭР представляет собой полученное количество тепловой энергии, холода и электрической энергии за счет ВЭР на действующих утилизационных установках.

**Планируемая** выработка энергии за счет ВЭР – количество теплоты, хо-

лода и электрической энергии, которое намечается получить за счет ВЭР в плановом периоде при осуществлении плана развития данного производства, предприятия, отрасли с учетом ввода новых, модернизации действующих и вывода из эксплуатации устаревших утилизационных установок.

**Коэффициент утилизации ВЭР** – отношение фактической (планируемой) экономии топлива за счет ВЭР к экономически целесообразной (возможной).



**Рис. 17.1. Принципиальная схема использования энергоресурсов**

Разнообразие технологий, существующих в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве, процессов и установок их реализующих, приводит к многообразию вторичных энергоресурсов. Для определения возможностей, объемов и энергетических эффектов утилизации, разработки типовых приемов сокращения энергопотребления предприятием все многообразие ВЭР классифицируют по трем видам: горючие, тепловые и избыточного давления.

**Горючие (топливные) ВЭР** – это содержащие химически связанную энергию отходы технологических процессов, неиспользуемые или непригодные

для дальнейшей технологической переработки, которые можно использовать в качестве топлива.

**Тепловые ВЭР** – это физическая теплота отходящих газов технологических агрегатов, основной, побочной, промежуточной продукции и отходов производства, теплота рабочих тел систем охлаждения технологических агрегатов и установок, горячей воды и пара, отработанных или попутно полученных в технологических и энерготехнологических установках.

**ВЭР избыточного давления (силовые)** – это потенциальная энергия газов, выходящих из технологических агрегатов с повышенным давлением, которое необходимо снижать перед дальнейшим использованием этих газов или выбросом в атмосферу.

В комплексных энергоемких теплотехнологиях возможны источники всех видов ВЭР, при этом их классификация позволяет определить основные направления использования.

## 17.2. Горючие вторичные энергоресурсы

В черной металлургии источниками горючих ВЭР могут быть доменные, ферросплавные печи, кислородные конвертеры, из которых отводится доменный, конвертерный газ и газ ферросплавных печей. За счет использования горючих ВЭР покрывается 15–18 % необходимого топливопотребления отрасли.

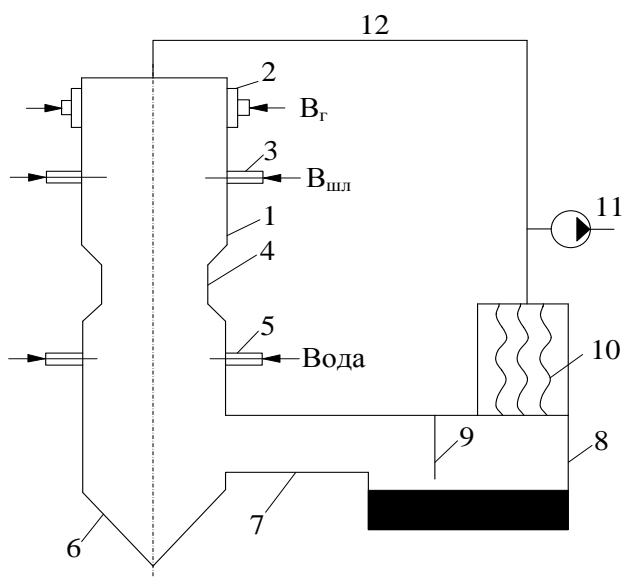
Доменный газ после очистки имеет теплоту сгорания 3 140–4 600 кДж/м<sup>3</sup> и используется в качестве топлива. Однако не весь доменный газ можно полезно использовать, так как во время загрузки печи часть его теряется. Обычно неизбежные потери доменного газа составляют около 5 %. Поэтому максимально возможное использование химической энергии доменного газа равно 95 % выхода.

При выплавке ферросплавов в качестве восстановителя применяется углерод коксика, который в электропечи окисляется до оксида углерода, являющегося основной составной частью ферросплавных газов. Содержание оксида углерода в газах колеблется в пределах 65–90 %, теплота сгорания такого газа составляет 8,4–11,3 МДж/м<sup>3</sup>, и в ряде случаев он используется в качестве топлива.

Конвертерные газы состоят в среднем из 90 % оксида углерода и 10 % диоксида углерода. Температура газов на выходе из конвертера колеблется в пределах 1 600–1 800 °С. Газы содержат значительное количество пыли – до 120–180 г/м<sup>3</sup>, а в отдельных случаях до 220 г/м<sup>3</sup>, поэтому обязательно должны от нее очищаться. Использование энергии конвертерных газов зависит от выбранного способа их охлаждения и очистки.

В черной металлургии активно используются схемы оборотного водоснабжения. Техническая вода отстаивается в баках отстойника от масел и окалина и направляется вновь в систему технического водоснабжения. Отделенные в баках шламы имеют в различных отраслях промышленности самый разнообразный состав. На Верх-Исетском металлургическом заводе (г. Екатеринбург) состав шламов следующий:  $W^p = 80 \div 85 \%$ ;  $A^p = 5 \div 10 \%$ ; содержание

масел (горючих веществ)  $10 \div 15\%$ . Состав масла по горючей массе приближенно принимают равным:  $H^r = 10\%$ ,  $C^r = 90\%$ . Теплота сгорания шламов крайне низка и не обеспечивает устойчивого горения. Поэтому шламы подвергают огневому обезвреживанию в циклонных топках (рис. 17.2), сжигая их совместно с природным газом. Температура в циклонной топке поддерживается на уровне  $1110\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$ .



**Рис. 17.2. Схема огневого обезвреживания шламов на Верх-Исетском металлургическом заводе:**

- 1 – циклонная топка; 2 – газовые горелки; 3 – форсунки для распыливания шламов;  
 4 – пережим; 5 – форсунки для распыливания воды; 6 – бункер для сбора шлака;  
 7 – газоход; 8 – пенный газопромыватель; 9 – регулирующий шибер; 10 – каплеуловитель;  
 11 – дымосос; 12 – линия подмеса раскаленных продуктов сгорания

В химической промышленности существует ряд специализированных подотраслей производства различных видов химической продукции, наиболее энергоемкими из которых являются азотная, хлорная, содовая отрасли, основная химическая промышленность, промышленность химических волокон, лаков и красок, а также промышленность пластических масс. Почти во всех отраслях химической промышленности образуется значительное количество горючих и тепловых ВЭР, использование которых играет существенную роль в покрытии потребности в тепловой энергии отдельных процессов химического производства.

К горючим ВЭР, например хлорной промышленности, относятся технический водород, жидкие горючие отходы, загрязненное дизельное топливо, фенольные смолы, и др.

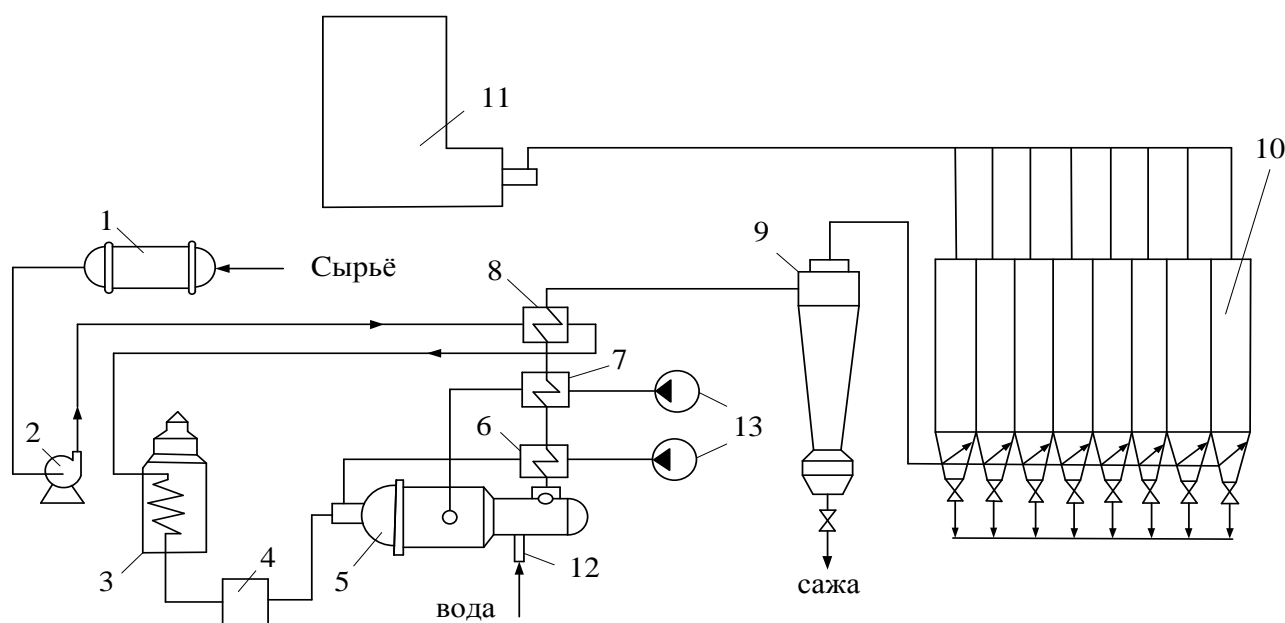
В нефтехимической промышленности в технологических процессах производства синтетического каучука также образуются горючие ВЭР, состоящие из водорода, различных углеводородов метанового и этиленового ряда.

Для сажевого производства характерными источниками ВЭР являются сажевые реакторы и печи – агрегаты современной технологической схемы производства сажи, основанной на высоком расходе углеводородного сырья (рис. 17.3). Уходящие газы после выделения сажи имеют следующий состав:  $H_2 = 7 \div 8\%$ ,  $CO = 6 \div 8\%$ ,  $CH_4 = 0,1 \div 2,0\%$ ,  $O_2 = 2 \div 3\%$ ,  $N_2 = 40\%$  и



$H_2O = 40$ . Химически связанная энергия уходящих газов составляет 30–40 % энергии топлива и сырья (масло специальных сортов), подведенных в реактор. Удельный выход газа в зависимости от марки сажи и применяемого сырья составляет 40–60 м<sup>3</sup>/кг сажи. Однако использование уходящих газов сажевого производства в качестве топлива затруднено, поскольку их теплота сгорания составляет 1,5–2,1 МДж/м<sup>3</sup> и находится ниже предела устойчивого горения.

Белгородским котельным заводом разработаны специальные пакетно-конвективные котлы (рис. 17.4), в которых сажевый газ сжигается совместно с природным газом либо мазутом, а его энергия используется для выработки пара. Воздух в котлах ПКК подогревают до температуры 390 °С, поэтому воздухоподогреватель размещают по ходу газов перед экономайзером котла.



**Рис. 17.3. Технологическая схема производства сажи:**

- 1 – теплообменник; 2 – сырьевой насос; 3 – печь для подогрева сырья; 4 – фильтр;  
 5 – реактор; 6 – подогреватель воздуха высокого давления; 7 – подогреватель воздуха низкого давления; 8 – подогреватель сырья; 9 – циклон; 10 – рукавные фильтры;  
 11 – котел-утилизатор; 12 – форсунка для подачи воды; 13 – вентиляторы

Количество природного газа, подаваемого в предтопок для обеспечения устойчивого горения, может быть рассчитано либо по заданной теплоте сгорания смеси сажевого и природного газа

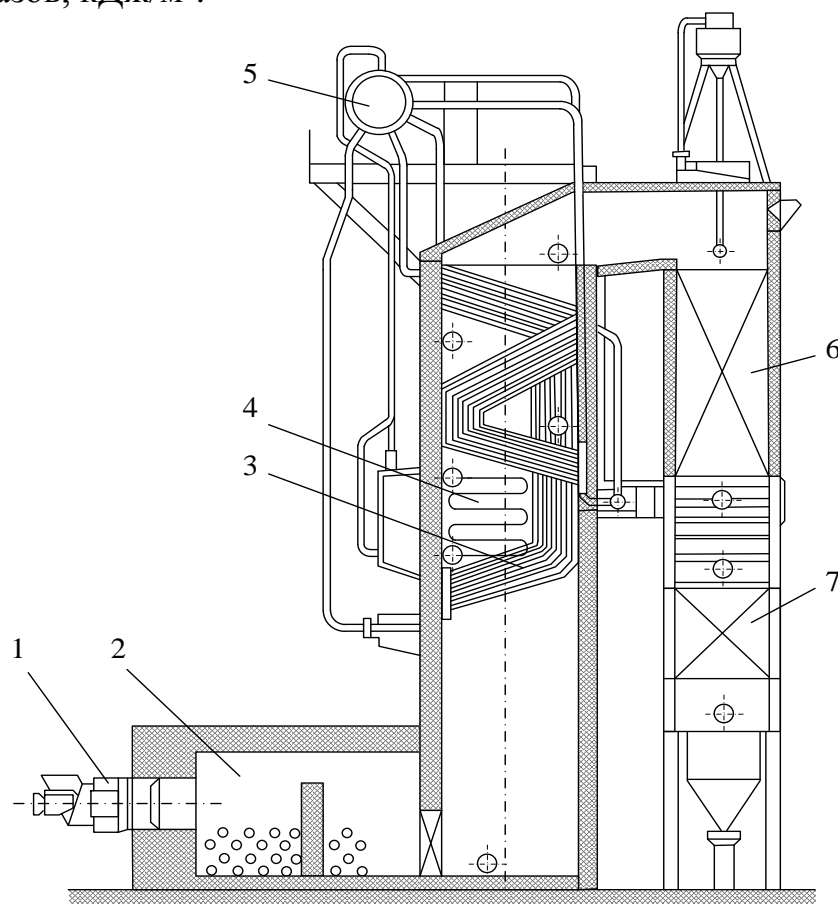
$$x = \frac{Q_{см} - Q_{н}^p}{Q_{пр} - Q_{см}}, \quad (17.1)$$

либо по заданной температуре газов  $t_r$  в предтопке (1 150–1 300 °С)

$$x = \frac{I_r - Q_{н}^p}{Q_{пр} - I_{пр}}, \quad (17.2)$$

где  $Q_{н}^p$ ,  $Q_{пр}$  и  $Q_{см}$  – теплота сгорания соответственно сажевого газа, природного газа и их смеси, кДж/м<sup>3</sup>;

$I_{\text{г}}$  и  $I_{\text{пр}}$  – энтальпии соответственно продуктов сгорания сажевого и природного газов, кДж/м<sup>3</sup>.



**Рис. 17.4. Пакетно-конвективный котел-утилизатор ПКК-75/24:**  
1 – горелка; 2 – топка; 3 – ширмы; 4 – пароперегреватель; 5 – барабан;  
6 – воздухоподогреватель; 7 – экономайзер

В целлюлозно-бумажной промышленности горючие ВЭР представлены в виде растворов, содержащих мельчайшие частицы целлюлозы и подлежащих регенерации и кородреvesных отходов. Сжигание этих горючих ВЭР позволяет на 60–80 % покрывать потребность целлюлозно-бумажных предприятий в топливно-энергетических ресурсах.

Использование коры и древесных отходов в качестве топлива требует их предварительного обезвоживания до 50–55 %. Зарубежный опыт показывает, что, применяя современное энергетическое оборудование, использование коры и древесных отходов можно сделать весьма эффективным. Во многих странах перевод существующих паровых котлов с мазута и природного газа на кору и древесные отходы является важным направлением реконструкции котлоагрегатов, установленных в энергогенерирующих системах целлюлозно-бумажных предприятий. Только за последние 3–4 года на эти цели, а также на установку новых котлов для сжигания коры и древесных отходов в США израсходовано более 1 млрд долл. Подобная тенденция наблюдается и в Скандинавских странах.

Удельный выход горючих ВЭР определяется произведением удельного количества энергоносителя на его энергетический потенциал

удельный выход натуральных горючих ВЭР, кДж/ед. продукции,

$$q^r = mQ_n^p; \quad (17.3)$$

удельный выход горючих ВЭР, выраженный в условном топливе, кг у.т./ед. продукции, кг у.т./ч,

$$b = m \frac{Q_n^p}{Q_y}; \quad (17.4)$$

где  $m$  – удельное количество твердого, жидкого, газообразного энергоносителя, кг ( $\text{м}^3$ ) на единицу продукции, единицу сырья (топлива) или в единицу времени (ч);

$Q_y$  – теплота сгорания условного топлива,  $Q_y = 29,33$  МДж/кг (7 000 ккал/кг).

При использовании горючих ВЭР в смеси с высококалорийным топливом (угольной пылью, природным газом или мазутом) часто снижается к. п. д. топливосжигающей установки вследствие роста потерь от механической и химической неполноты сгорания, по сравнению с работой на высококалорийном топливе, а также вследствие отклонений температурных режимов от расчетных. Для учета этих обстоятельств вводится поправочный коэффициент  $a$ . Удельный выход натуральных горючих ВЭР, кДж/ед. продукции,

$$q^r = amQ_n^p. \quad (17.5)$$

Для расчета  $a$  используют соотношение

$$a = 1 - \Delta\eta_y. \quad (17.6)$$

где  $\Delta\eta_y$  – снижение теплового к. п. д. топливосжигающей установки.

### 17.3. Тепловые отходы

Из определения тепловых ВЭР следует, что их источниками могут являться котельные установки, контактные газовые водоподогреватели, технологические печи, рекуперативные паропотребляющие установки, аппараты для тепловой обработки продукции, термические и термостатные камеры, сушильные установки.

К тепловым вторичным энергетическим ресурсам не относятся:

- а) теплота продуктов (отходящих газов, основной, побочной, промежуточной продукции и отходов производства), возвращаемая в агрегат-источник ВЭР за счет регенерации или рециркуляции;
- б) энтальпия конденсата, возвращаемого в парогенераторы или источники пароснабжения;
- в) энтальпия продуктов, направляемых в следующую стадию переработки без изменения их параметров и энергетического потенциала;
- г) теплота обратной воды в системах теплоснабжения.

Тепловые ВЭР в энергоемких отраслях промышленности являются наиболее представительной группой, на долю которой приходится более 60% потенциала энергосбережения.

В черной металлургии все доменные печи оборудованы системой искус-

ственного охлаждения, предназначенной для защиты от перегрева несущих конструкций и деталей, работающих при высоких температурах, а также для предохранения кожуха и фундамента печи от воздействия высоких температур. До настоящего времени наиболее распространенным видом охлаждения являлось водяное охлаждение, при этом с оборотной или проточной водой уносится до 0,42–0,50 ГДж/т чугуна подведенной в печь теплоты.

При водяном охлаждении повышение температуры охлаждающей воды во избежание образования накипи на охлаждаемых элементах допускается не более чем на 15–20 °С. При этом не используется огромное количество теплоты, отводимой от охлаждаемых элементов металлургических печей, ввиду её низкого потенциала. Перевод элементов доменных печей (холодильников, воздушных фурм, клапанов горячего дутья) на испарительное охлаждение дает большие технологические преимущества, так как увеличивается срок службы охлаждаемых элементов, сокращается расход охлаждающей воды и, следовательно, расход электроэнергии на ее перекачку.

Уходящие газы мартеновских печей на выходе из регенераторов имеют температуру от 500 до 700 °С. Использование уходящих газов с такой температурой позволяет вырабатывать в котлах-утилизаторах пар довольно высоких параметров. При выплавке стали, значительное количество теплоты выходит из печи в виде физической теплоты уходящих газов, физической теплоты стали, теплоты охлаждения элементов печи и теплоты шлака.

Температура уходящих газов нагревательных устройств колеблется в очень широких пределах от 220–250 °С до 700–750 °С, а в печах, не имеющих рекуператоров, достигает 900–1 000 °С, что позволяет в утилизационных установках вырабатывать пар высоких параметров.

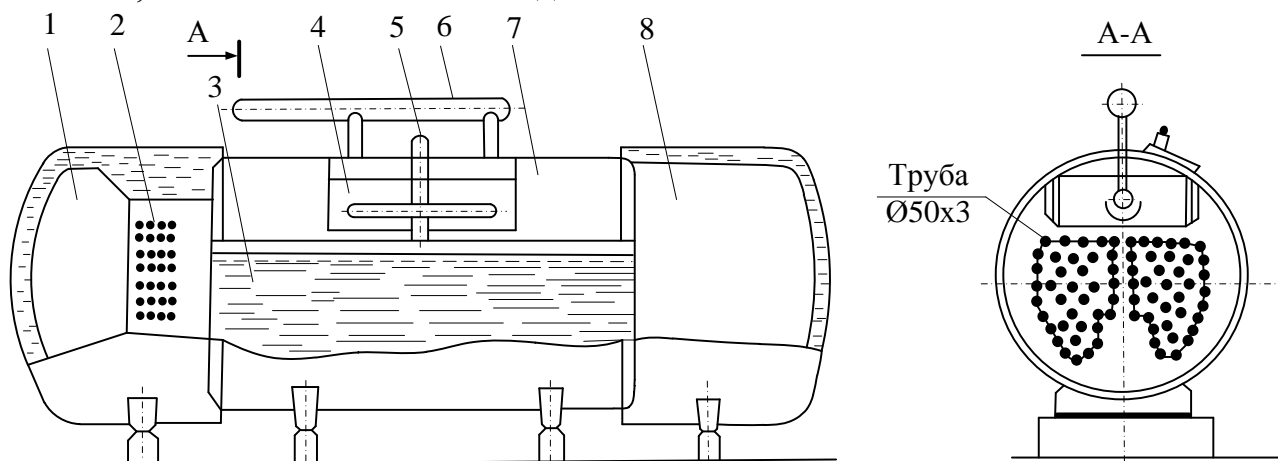
В прокатном производстве имеются термические печи, особенностью которых является периодичность работы. Поэтому вопрос о целесообразности утилизации теплоты уходящих газов термических печей должен решаться в тесной связи с возможностью периодического использования утилизационного пара.

В цветной металлургии основными ВЭР являются физическая теплота продукции побочных и промежуточных продуктов и отходов; физическая теплота уходящих газов технологических агрегатов и физическая теплота охлаждения печей. Тепловые ВЭР в цветной металлургии характеризуются следующими особенностями: концентрацией больших количеств ВЭР в одном агрегате-источнике (до 40 МВт); постоянством режима выхода в большинстве случаев; высокой запыленностью газов расплавленными или размягченными продуктами уноса; агрессивностью уходящих газов из-за содержания в них сернистого ангидрида и расплавленного уноса. Эти особенности свидетельствуют как о больших потенциальных возможностях использования ВЭР для экономии топлива, так и о технических трудностях разработки и эксплуатации утилизационного оборудования. Основным направлением использования физической теплоты уходящих газов в цветной металлургии является применение специальных котлов-утилизаторов для получения пара либо нагрев воздуха, идущего на горение в печь.

На предприятиях машиностроения ВЭР сравнительно высоких парамет-

ров образуются в основном в нагревательных и термических печах в виде теплоты уходящих газов и теплоты охлаждения. Низкопотенциальные ВЭР образуются в виде теплоты отработавшего пара давлением 0,10–0,12 МПа от прессов и молотов, являющихся основными потребителями технологического пара средних параметров.

Использование физической теплоты технологических газов на многих предприятиях химической промышленности осуществляется с помощью паровых котлов-утилизаторов (рис. 17.5). Так, в производстве аммиака начальная температура газов, поступающих в котлы-утилизаторы, колеблется от 900 до 1 500 °С, в котлах она снижается до 180 °С.



**Рис. 17.5. Горизонтальный котел-утилизатор Г-250П:**

- 1 – входная камера; 2 – трубы пароперегревателя; 3 – трубы испарителя;  
4 – паросепарационное устройство; 5 – подвод питательной воды; 6 – паровой коллектор;  
7 – испарительный барабан; 8 – выходная камера

Котлы-утилизаторы содержат обычно экономайзерные, испарительные поверхности нагрева, и пароперегреватель. У котлов-утилизаторов отсутствуют топочное устройство и воздухоподогреватель. Продукты сгорания (отходящие технологические газы) в газотрубных котлах-утилизаторах проходят внутри труб, размещенных в водяном объеме барабана. Эти котлы имеют следующие достоинства: высокая газоплотность; использование облегченной тепловой изоляции из-за сравнительно низкой температуры стенки испарительного барабана; простота в изготовлении и монтаже. Недостатки газотрубных котлов-утилизаторов: низкое значение коэффициента теплоотдачи при продольном движении газа; низкое давление вырабатываемого пара (как правило, 1,4 МПа) и ограниченный диаметр барабана; быстрый занос твердыми частицами внутренних поверхностей труб. В зависимости от конструктивного оформления газотрубные котлы делят на горизонтальные и вертикальные.

В нефтеперерабатывающей промышленности основными тепловыми ВЭР являются теплота уходящих дымовых газов трубчатых печей, теплота нагретых нефтепродуктов и теплота охлаждающей воды. Для трубчатых печей большинства технологических установок температура дымовых газов равна в среднем 400 °С, а за печами коксовых установок и установок пиролиза она достигает 600 °С. Теплота газов используется в рекуператорах для подогрева воздуха, подаваемого в печь при сжигании топлива, или в котлах-утилизаторах для выра-

ботки пара технологических параметров.

Низкотемпературные ВЭР на предприятиях можно разделить на парообразные, жидкие, газообразные.

К **парообразным** низкотемпературным ВЭР относятся пароконденсатная смесь и вторичные (соковые) пары. Источниками пароконденсатной смеси являются варочные котлы с паровыми рубашками кожухотрубные водоподогреватели, выпарные и сушильные установки, калориферы, стерилизаторы, трубчатые пастеризаторы, деаэраторы и другие аппараты. Энергетический потенциал (энтальпия) пароконденсатной смеси определяется ее давлением и содержанием в ней «пролетного» пара. Содержание в пароконденсатной смеси «пролетного» пара зависит от наличия и типа конденсатоотводчиков и соблюдения технических условий эксплуатации.

К **жидким** низкотемпературным ВЭР относятся сбросные горячие и теплые воды, которые образуются при использовании пара в смесительных технологических аппаратах. К ним относится также охлаждающая вода из рубашек компрессоров и конденсаторов холодильных установок. Вода с температурой выше 60 °С условно относится к горячей, а ниже 60 °С – к теплой.

К **газообразным** низкотемпературным ВЭР относятся уходящие дымовые газы, отработавший воздух и вентиляционные выбросы. Источниками дымовых газов являются котельные установки и технологические печи, работающие на газообразном и жидком топливе. Энергетический потенциал дымовых газов зависит от их температуры и содержания в них водяных паров. Наиболее перспективными для использования в утилизационных установках являются дымовые газы, образующиеся при сжигании природного газа, так как в них отсутствуют соединения серы.

При разработке мероприятий по утилизации ВЭР в первую очередь необходимо использовать наиболее энергоёмкие теплоносители: пароконденсатную смесь, вторичные пары, уходящие дымовые газы котельных установок и технологических печей.

Удельный выход тепловых ВЭР, кДж/ед. продукции,

$$q^T = m\Delta h, \quad (17.7)$$

где  $\Delta h$  – разность энтальпий до и после теплоутилизационной установки, кДж/кг.

При утилизации теплоты энергоносителя, не претерпевающего в теплоутилизационной установке фазовых превращений, удельный выход определяют, кДж/ед. продукции,

$$q^T = m(c_1 t_1 - c_2 t_2). \quad (17.8)$$

При утилизации теплоты пароконденсатной смеси ее начальная энтальпия  $h$ , кДж/кг, зависит от давления  $P$  и содержания «пролетного» пара.

$$h = m[h'(1 - x_{\text{пп}}) + h''x_{\text{пп}}], \quad (17.9)$$

где  $x_{\text{пп}}$  – доля пролетного пара.

Опыт использования ВЭР свидетельствует о быстрой окупаемости затрат на использование утилизационных установок, которые в несколько раз меньше затрат на добычу эквивалентного по энергетической ценности количества топлива.

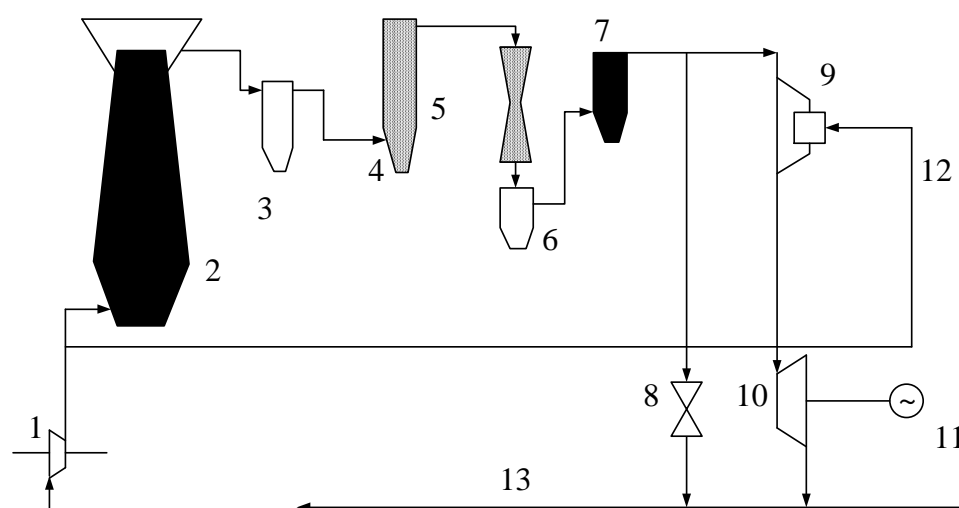
## 17.4. Вторичные энергоресурсы избыточного давления

ВЭР данного вида характеризуются следующими параметрами: избыточное давление доменного газа, перепад давлений природного газа между давлением в газопроводе и у потребителя, перепад давления пара между давлением в котле и требуемым давлением в технологической установке.

В черной металлургии при доменном производстве вторичным энергоресурсом является доменный газ, имеющий не только высокую теплоту сгорания, но и значительное избыточное давление. Избыточное давление доменных газов используют для выработки электроэнергии в газовых утилизационных бескомпрессорных турбоустановках (рис. 17.6).

Доменный газ после газоочистки и отделения влаги подается в смешивающий подогреватель, в котором за счет сжигания части доменного газа осуществляется его подогрев до температуры 100–180 °С. Воздух, необходимый для сжигания части доменного газа, подается от доменной воздуходувки с давлением 0,26–0,33 МПа. После смешивающего подогревателя доменный газ подается в газовую расширительную турбину, из которой с давлением 0,015 МПа поступает в газовую сеть завода.

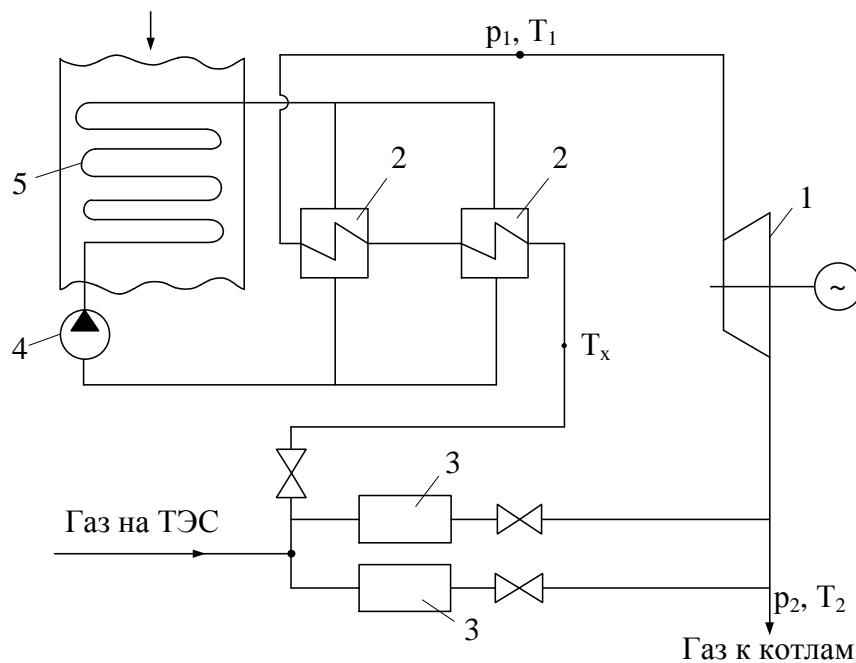
Детандер-генераторный агрегат представляет собой устройство, в котором природный газ используется в качестве рабочего тела (без сжигания). В состав агрегата входят детандер, генератор, теплообменное оборудование, системы контроля и регулирования параметров работы. В детандере энергия газового потока преобразуется в механическую работу. Давление и температура газа при этом снижаются. Механическая энергия, полученная в детандере, может быть преобразована в электрическую энергию в соединенном с детандером генераторе.



**Рис. 17.6. Схема установки с газовой утилизационной бескомпрессорной турбиной:**

1 – воздуходувка; 2 – доменная печь; 3 – пылеуловитель; 4 – скруббер;  
5 – трубы-распылители; 6 – водоотделитель; 7 – электрофилтры; 8 – автоматическое дроссельное устройство; 9 – смешивающий подогреватель газа; 10 – газовая утилизационная бескомпрессорная турбина; 11 – электрогенератор; 12 – воздух на горение в смешивающий подогреватель; 13 – магистраль доменного газа

На рис. 17.7 представлена технологическая схема газотурбинной распределительной станции, предусматривающая возможность параллельной работы детандер-генераторного агрегата и традиционного газораспределительного пункта (ГРП). Часть газа подается на ДГА, а остальная часть газа подается к котлам через ГРП. Последний состоит из четырех ниток, каждая из которых рассчитана на редуцирование газа по одноступенчатой схеме, причем три нитки рассчитаны на полный расход каждая, а одна – на нагрузку 30 % и является растопочной.



**Рис. 17.7. Технологическая схема газотурбинной распределительной станции:**

1 – расширительная турбина (детандер); 2 – подогреватели газа; 3 – газораспределительный пункт; 4 – циркуляционный насос; 5 – экономайзер

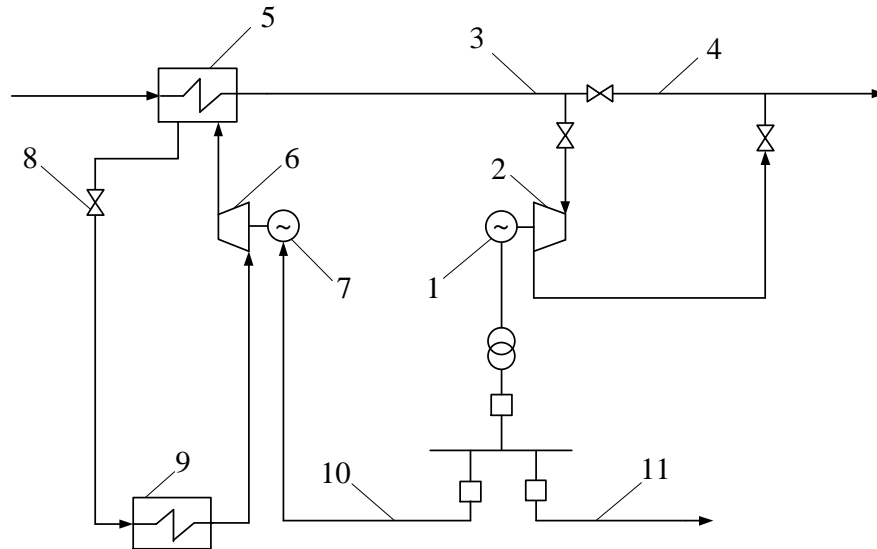
При параллельной работе турбины и ГРП одна из его основных ниток работает в безрасходном «следящем» режиме. В случае внезапного останова турбины поток газа переключается полностью на ГРП и эта резервная нитка переводится на работу в расходном режиме. При этом ГРП обеспечивает редуцирование всего расхода газа, поступающего на станцию.

Технологической схемой предусматривается подогрев газа перед турбиной для того, чтобы после понижения давления на лопаточном аппарате температура газа на выхлопе сохранялась положительной. Система подогрева газа представляет собой автономный контур: экономайзер низкого давления, устанавливаемый непосредственно на одном из действующих котлов, и два подогревателя газа, размещаемые в здании ГТРС. В качестве греющей среды используется конденсат. В экономайзере конденсат нагревается за счет теплоты уходящих газов котлов до 170 °С. Затем теплота этого конденсата передается в подогревателе газов природному газу, в результате чего температура последнего перед турбиной повышается до 135 °С.

Работа существующих ДГА, несмотря на использование избыточного давления транспортируемого природного газа для получения электроэнергии, приводит к загрязнению окружающего воздушного бассейна из-за сжигания ор-



ганического топлива. Избежать этого можно, подогревая газ перед детандером с помощью теплонасосной установки (ТНУ), использующей часть энергии, вырабатываемой электрогенератором ДГА, для обеспечения своей работы. При таком техническом решении для обеспечения нормальной работы ДГА используется лишь потенциальная энергия давления транспортируемого природного газа и низкопотенциальная энергия. В качестве источника низкопотенциальной энергии могут быть использованы вторичные энергетические ресурсы или теплота окружающей среды (рис. 17.8).



**Рис. 17.8. Принципиальная схема установки для реализации способа производства электроэнергии при использовании избыточного давления транспортируемого газа без сжигания:**

1 – электрогенератор; 2 – детандер; 3 – газопровод высокого давления; 4 – газопровод низкого давления; 5 – теплообменник подогрева газа; 6 – компрессор; 7 – электродвигатель; 8 – дросселирующее устройство; 9 – испаритель; 10, 11 – электрические сети

Установка содержит соединенный с электрическим генератором 1 детандер 2. Детандер подключается параллельно дросселирующему устройству, разделяющему трубопроводы высокого 3 и низкого 4 давления. Теплообменник 5, служащий для подогрева газа высокого давления, является одновременно и элементом теплонасосной установки, в состав которой входят компрессор 6, приводимый в действие электродвигателем 7, дросселирующее устройство 8, испаритель 9. Электрические связи 10 и 11 предназначены для подачи электроэнергии на электродвигатель 7 теплонасосной установки и внешнему потребителю соответственно.

Удельный выход ВЭР избыточного давления, кДж/ед. продукции, кВт

$$q^{\Delta p} = ml, \quad (17.10)$$

где  $l$  – работа адиабатного расширения, кДж/кг.

Работа изохэнтропного (адиабатного) расширения для газообразных энергоносителей равна перепаду энтальпий

$$l = \Delta h = h_1 - h_2, \quad (17.11)$$

где  $h_1$  – энтальпия газа перед расширением при давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$ ,

кДж/кг;  $h_2$  – энтальпия в конце изоэнтропного расширения до давления  $p_2$  при температуре  $t_2$ , кДж/кг.

Для водяного пара перепад энтальпий в процессе изоэнтропного расширения от давления  $p_1$  до давления  $p_2$  определяется по  $hs$ -диаграмме. Для жидкостей работа адиабатного расширения

$$l = \frac{p_1 - p_2}{\rho}, \quad (17.12)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – соответственно давление жидкого теплоносителя на выходе из технологической установки и при поступлении на следующую ступень использования или давление окружающей среды при выбросе энергоносителя в атмосферу;  $\rho$  – плотность жидкости.

### Вопросы к главе 17

1. Классификация вторичных энергоресурсов.
2. Горючие вторичные энергоресурсы.
3. Вторичные энергоресурсы. Тепловые отходы.
4. Вторичные энергоресурсы избыточного давления.

## **18. Экологические проблемы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии**

### **18.1. Проблема взаимодействия энергетики и экологии**

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 экологический аспект их воздействия на окружающую среду.

Существует мнение, что выработка электроэнергии за счет возобновляемых источников представляет собой абсолютно экологически «чистый» вариант. Это не совсем верно, так как эти источники энергии обладают принципиально иным спектром воздействия на окружающую среду по сравнению с традиционными энергоустановками на органическом, минеральном и гидравлическом топливе, причем в некоторых случаях воздействия последних представляют даже меньшую опасность. К тому же определенные виды экологического воздействия НВИЭ на окружающую среду не ясны до настоящего времени, особенно во временном аспекте, а потому изучены и разработаны еще в меньшей степени, чем технические вопросы использования этих источников.

Разновидностью возобновляемых источников энергии являются гидроэнергетические ресурсы. Долгое время их также относили к экологически «чистым» источникам энергии. Не принимая во внимание экологические последствия такого использования, естественно, не проводилось достаточных разработок природоохранных и средозащитных мероприятий, что привело гидроэнергетику на рубеже 1990-х годов к глубокому кризису. Поэтому возможные экологические последствия применения НВИЭ должны быть исследованы заранее.

Преобразование энергии нетрадиционных возобновляемых источников в наиболее пригодные формы ее использования – электричество или тепло – 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. Таким образом, актуальной становится задача разработки научно обоснованных методов экономической оценки экологических последствий использования различных видов возобновляющихся источников энергии и новых методов преобразования энергии, которые должны количественно учесть факторы иного, по сравнению с традиционными установками, воздействия на окружающую среду.

Рассмотрим основные факторы экологического воздействия нетрадиционных возобновляющихся источников энергии на различные природные среды и объекты.

## 18.2. Экологические последствия развития солнечной энергетики

Солнечные станции являются еще недостаточно изученными объектами, поэтому отнесение их к экологически чистым электростанциям нельзя назвать полностью обоснованным. В лучшем случае к экологически чистой можно отнести конечную стадию – стадию эксплуатации СЭС, и то относительно.

Солнечные станции являются достаточно землеемкими. Удельная землеемкость СЭС изменяется от 0,001 до 0,006 га/кВт с наиболее вероятными значениями 0,003–0,004 га/кВт. Это меньше, чем для ГЭС, но больше, чем для ТЭС и АЭС. При этом надо учесть, что солнечные станции весьма материалоемки (металл, стекло, бетон и т.д.), к тому же в приведенных значениях землеемкости не учитываются изъятие земли на стадиях добычи и обработки сырья. В случае создания СЭС 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.

Гелиотехника косвенным образом оказывает влияние на окружающую среду. В районах ее развития должны возводиться крупные комплексы по производству бетона, стекла и стали. Во время изготовления кремниевых, кадмиевых и арсенидотелуровых фотоэлектрических элементов в воздухе производственных помещений появляются кремниевая пыль, кадмиевые и арсенидные соединения, опасные для здоровья людей.

Космические СЭС за счет 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:

- а) отчуждении земельных площадей, их возможной деградации;
- б) большой материалоемкости;
- в) возможности утечки рабочих жидкостей, содержащих хлораты и нитриты;
- г) опасности перегрева и возгорания систем, заражения продуктов токсичными веществами при использовании солнечных систем в сельском хозяйстве;

- д) изменении теплового баланса, влажности, направления ветра в районе расположения станции;
- е) затемнении больших территорий солнечными концентраторами, возможной деградации земель;
- ж) воздействии на климат космических СЭС;
- з) создании помех телевизионной и радиосвязи;
- и) передаче энергии на Землю в виде микроволнового излучения, опасного для живых организмов и человека.

### 18.3. Влияние ветроэнергетики на природную среду

Факторы воздействия ВЭС на природную среду, а также последствия этого влияния и основные мероприятия по снижению и устранению отрицательных проявлений приведены в таблице 18.1. Рассмотрим некоторые из них более подробно.

Под мощные промышленные ВЭС необходима 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. Например, в Калифорнии в 50 км от г. Сан-Франциско на перевале Алтамонт-Пасс земля, отведенная под парк мощной ВЭС, одновременно служит для сельскохозяйственных целей.

Проблема использования территории упрощается при размещении ВЭС на акваториях. Например, предложения по созданию мощных ВЭС на мелководных акваториях Финского залива и Ладожского озера не связаны с изъятием больших территорий из хозяйственного пользования. Из отводимой площади акватории для ВЭС непосредственно под сооружения для ВЭУ понадобится лишь около 2 %. В Дании дамба, на которой установлен парк ВЭУ, одновременно является пирсом для рыболовных судов. Использование территории, занятой ветровым парком, под другие цели зависит от шумовых эффектов и степени риска при поломках ВЭУ. У больших ВЭУ лопасть при отрыве может быть отброшена на 400–800 м.

Наиболее важный фактор влияния ВЭС на окружающую среду – это акустическое воздействие. В зарубежной практике выполнено достаточно исследований и натурных изменений уровня и частоты шума для различных 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 нескольких 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.

Таблица 18.1

**Методы устранения негативного влияния ВЭУ на окружающую среду**

Факторы воздействия	Методы устранения
1. Изъятие земельных ресурсов, изменение свойств почвенного слоя	Размещение ВЭУ на неиспользуемых землях Оптимизация размещения – минимизация расхода земли Целенаправленный учет изменений свойств почвенного слоя Компенсационные расчеты с землепользователями
2. Акустическое воздействие (шумовые эффекты)	Изменение числа оборотов ветроколеса (ВК) Изменение форм лопасти ВК Удаление ВЭУ от объектов социальной инфраструктуры Замена материалов лопастей ВК
3. Влияние на ландшафт и его восприятие	Учет особенностей ландшафта при размещении ВЭУ Рекреационное использование ВЭУ Изыскание различных форм опорных конструкций, окраски и т.д.
4. Электромагнитное излучение, телевидение и радиосвязь	Сооружение ретрансляторов Замена материалов лопастей ВК Внедрение специальной аппаратуры в конструкцию ВЭУ Удаление от коммуникаций
5. Влияние на орнитофауну на перелетных трассах и морскую фауну при размещении ВЭС на акваториях	Анализ поражаемости птиц на трассах перелета и рыб на путях миграции Расчет вероятности поражения птиц и рыб
6. Аварийные ситуации, опасность поломки и отлета поврежденных частей ВК	Расчет вероятности поломок ветроколеса, траектории и дальности отлета Оценка надежности безаварийной работы ВЭУ Зонирование производства вокруг ВЭУ
7. Факторы, улучшающие экологическую ситуацию	Уменьшение силы ветра Снижение ветровой эрозии почв Уменьшение ветров с акваторий водоемов и водохранилищ

Удаление ВЭС от населенных пунктов и мест отдыха решает проблему шумового эффекта для людей. Однако шум может повлиять на фауну, в том числе на морскую фауну в районе экваториальных ВЭС. По зарубежным данным, вероятность поражения птиц ветровыми турбинами оценивается в 10 %, если пути миграции проходят через ветровой парк. Размещение ветровых парков повлияет на пути миграции птиц и рыб для экваториальных ВЭС.

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:**

- а) шумовые воздействия, электро-, радио- и телевизионные помехи;
- б) отчуждение земельных площадей;
- в) локальные климатические изменения;
- г) опасность для мигрирующих птиц и насекомых;
- д) ландшафтная несовместимость, непривлекательность, визуальное неприятие, дискомфортность;
- е) изменение традиционных морских перевозок, неблагоприятные воздействия на морских животных.

#### **18.4. Возможные экологические проявления геотермальной энергетики**

Основное воздействие на окружающую среду геотермальные электростанции оказывают в период разработки месторождения, строительства паропроводов и здания станций, но оно обычно ограничено районом месторождения.

Природный пар или газ добываются бурением скважин глубиной от 300 до 2700 м. Под действием собственного давления пар поднимается к поверхности, где собирается в теплоизолированные трубопроводы и подается к турбинам. К примеру, в долине гейзеров (США) производительность каждой скважины обеспечивает в среднем 7 МВт полезной мощности. Для работы станции мощностью 1 000 МВт требуется 150 скважин, которые занимают территорию более 19 км<sup>2</sup>.

Потенциальными последствиями геотермальных разработок являются оседание почвы и сейсмические эффекты. Оседание возможно всюду, где нижележащие слои перестают поддерживать верхние слои почвы и выражается в снижении дебитов термальных источников и гейзеров и даже полном их исчезновении. Так, при эксплуатации месторождения Вайрокей (США) с 1954 по 1970 гг. поверхность земли просела почти на 4 м, а площадь зоны, на которой произошло оседание грунта, составила около 70 км<sup>2</sup>, продолжая ежегодно увеличиваться.

Высокая сейсмическая активность является одним из признаков близости геотермальных месторождений, и этот признак используется при поисках ресурсов. Однако интенсивность землетрясений в зоне термальных явлений, вызванных вулканической деятельностью, обычно значительно меньше интенсив-

ности землетрясений, вызванных крупными смещениями земной коры по разломам. Поэтому нет оснований считать, что разработка геотермальных ресурсов увеличивает сейсмическую активность.

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. Пар, добываемый из геотермальных скважин, в основном является водяным. Газовые примеси на 80 % состоят из двуокиси углерода и содержат небольшую долю метана, водорода, азота, аммиака и сероводорода. Наиболее вредным является сероводород (0,022 5 %). В геотермальных водах содержатся в растворенном виде такие газы, как  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ .

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 – теплосъемные агрегаты – скважина – пласт». Это позволит избежать поступления термальных вод на поверхность земли, в грунтовые воды и поверхностные водоемы, обеспечить сохранение пластового давления, исключить оседание грунта и любую возможность сейсмических проявлений.

Неблагоприятные экологические воздействия **геотермальной энергетики** на экологию:

- а) отчуждение земель;
- б) изменение уровня грунтовых вод, оседание почвы, заболачивание;
- в) подвижки земной коры, повышение сейсмической активности;
- г) выбросы газов (метан, водород, азот, аммиак, сероводород) ;
- д) выброс тепла в атмосферу или в поверхностные воды;
- е) сброс отравленных вод и конденсата, загрязненных в небольших количествах аммиаком, ртутью, кремнеземом;
- ж) загрязнение подземных вод и водоносных слоев, засоление почв;
- з) выбросы больших количеств рассолов при разрыве трубопроводов.



## 18.5. Экологические последствия использования энергии океана

При преобразовании любых видов океанической энергии неминуемы определенные изменения естественного состояния затрагиваемых экосистем.

К отрицательным последствиям работы установок, использующих термальную энергию океана, можно отнести возможные утечки в океан аммиака, пропана или фреона, а также веществ, применяемых для промывки теплообменников (хлор и др.). Возможно значительное выделение углекислого газа из поднимаемых на поверхность холодных глубинных вод из-за снижения в них парциального давления  $\text{CO}_2$  и повышения температуры. Выделение  $\text{CO}_2$  из воды при работе океанических ТЭС предположительно на 30 % больше, чем при работе обычных ТЭС той же мощности, использующих органическое топливо. Охлаждение вод океана вызывает увеличение содержания питательных веществ в поверхностном слое и значительный рост фитопланктона. При подъеме к поверхности глубинные микроорганизмы будут загрязнять океан и придется применять специальные меры для его очистки.

Строительство ПЭС сказывается неблагоприятно на состоянии прибрежных земель, самого побережья и аквальной вдольбереговой полосы: изменяются условия подтопления, засоления, размыва берегов, формирование пляжей и т. д. Изменение движения грунтовых вод влияет на динамику засоления прибрежных земель.

На ПЭС в КНР изучены закономерности отложения наносов в водохранилище ПЭС и за плотиной, а также мероприятия по борьбе с ними. Эксплуатация ПЭС «Ране» во Франции показала, что принятая в ее проекте однобассейновая схема двухстороннего действия максимально сохраняет природный цикл колебаний бассейна и гарантирует тем самым экологическую безопасность приливной энергии.

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

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

Один из важных вопросов влияния на окружающую среду преобразования энергии волн в прибрежной зоне – это воздействие на процессы в ее пределах. Вещества, перемещаемые волнами, называются прибрежными наносами. Движение их необходимо для стабилизации береговой полосы, т. е. баланса между эрозией и отложениями. В связи с этим цепь из преобразователей энергии волн целесообразно устанавливать в местах намечаемых волноломов, чтобы они выполняли двойную функцию: использование энергии волн и защиту побережья.

Неблагоприятные экологические последствия в **гидротермальной энергетике**:

- а) утечки в океан аммиака, фреона, хлора и др.;
- б) выделение  $\text{CO}_2$  из воды;
- в) изменение циркуляции вод, появление региональных и биологических аномалий под воздействием гидродинамических и тепловых возмущений;
- г) изменение климата.

Неблагоприятные экологические последствия в **приливной энергетике**:

- а) периодическое затопление прибрежных территорий, изменение землепользования в районе ПЭС, флоры и фауны акватории;
- б) строительное замутнение воды, поверхностные сбросы загрязненных вод.

Неблагоприятные экологические последствия в **волновой энергетике**:

- а) эрозия побережья, смена движения прибрежных песков;
- б) значительная материалоемкость;
- в) изменение сложившихся судоходных путей вдоль берегов;
- г) загрязнение воды в процессе строительства, поверхностные сбросы.

## **18.6. Экологическая характеристика использования биоэнергетических установок**

Биоэнергетические станции по сравнению с традиционными электростанциями и другими НВИЭ являются наиболее 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. По концентрации некоторых загрязнителей они превосходят продукты сгорания нефти и ее производных. Другим экологическим последствием сжигания древесины являются значительные тепловые потери.

По сравнению с древесиной биогаз – более чистое топливо, 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:**

- а) выбросы твердых частиц, канцерогенных и токсичных веществ, окиси углерода, биогаза, биоспирта;
- б) выброс тепла, изменение теплового баланса;
- в) обеднение почвенной органики, истощение и эрозия почв;
- г) взрывоопасность;
- д) большое количество отходов в виде побочных продуктов (промывочные воды, остатки перегонки).

**Вопросы к главе 18**

1. Проблема взаимодействия энергетики и экологии.
2. Экологические последствия развития солнечной энергетики.
3. Влияние ветроэнергетики на природную среду.
4. Возможные экологические проявления геотермальной энергетики.
5. Экологические последствия использования энергии океана.
6. Экологическая характеристика использования биоэнергетических установок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потребление энергии – важный показатель жизненного уровня. В те времена, когда человек добывал пищу, собирая лесные плоды и охотясь на животных, ему требовалось в сутки около 8 МДж энергии. После овладения огнем эта величина возросла до 16 МДж: в примитивном сельскохозяйственном обществе она составляла 50 МДж, а в более развитом – 100 МДж.

За время существования нашей цивилизации много раз происходила смена традиционных источников энергии на новые, более совершенные. И не потому, что старый источник был исчерпан.

Солнце светило и обогревало человека всегда: и тем не менее однажды люди приручили огонь, начали жечь древесину. Затем древесина уступила место каменному углю. Запасы древесины казались безграничными, но паровые машины требовали более калорийного «корма».

Но и это был лишь этап. Уголь уступает свое лидерство на энергетическом рынке нефти. В наши дни ведущими видами топлива пока остаются нефть и газ. Но за каждым новым кубометром газа или тонной нефти нужно идти все дальше на север или восток, зарываться все глубже в землю. Немудрено, что нефть и газ будут с каждым годом стоить нам все дороже.

Замена? Нужен новый лидер энергетики.

В погоне за избытком энергии человек все глубже погружался в стихийный мир природных явлений и до какой-то поры не очень задумывался о последствиях своих дел и поступков.

Ситуация усугубляется еще тем, что мировые и российские запасы традиционных высокоценных энергоносителей – нефти, природного газа – близки к исчерпанию. Выбросы и сбросы загрязнений в окружающую среду превышают допустимые значения и могут вызвать необратимые планетарные кризисы. Неуклонно растут цены на энергоносители и соответственно тарифы на электрическую и тепловую энергию. Дефицит энергии не позволяет перейти к освоению новых обширных территорий, приходится отказываться от новых перспективных, но энергоемких технологий в металлургической и химической промышленности. Растет уровень энергопотребления в развивающихся странах.

В этих условиях базовая отрасль мирового народного хозяйства – энергетика – вынуждена осваивать нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Для их освоения ведутся систематические исследования окружающей природной среды с целью выявления и оценки возможностей использования ресурсов НВИЭ. Проблема осложняется низкими плотностями энергии в естественных и вторичных источниках, соответственно увеличиваются исходные затраты на строительство, материалоемкость и габариты энергоустановок. На период до 2010 года мировая энергетика предполагает довести производство электроэнергии и теплоты с использованием НВИЭ до 15–20 %.

Россия в этом отношении находится на одном из последних мест в мире. Общая доля НВИЭ в энергетическом балансе страны составляет на начало XXI в. доли процента. Отсутствует правовая база, нет стимулов для развития этого направления. Отсутствует отрасль, объединяющая разрозненные разработки в единую стратегию. В концепции Минтопэнерго освоению НВИЭ отво-

дится третьестепенная, вспомогательная роль. Несомненно, это положение скажется на экономическом отставании страны.

Специалистам в области энергетики предстоят большие работы в области освоения НВИЭ и совершенствования методов энергосбережения, аккумулярования и вторичного использования энергии. Экономия энергии открывает не меньшие возможности, чем освоение новых ее источников. В работах по освоению НВИЭ необходимо знание энергетического баланса, ресурсов энергоисточников, воды, земельных площадей, экологических показателей. Нужно учитывать капиталовложения, цены на сырье, расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание.

Сейчас начинается новый, значительный этап земной энергетики. Появляется энергетика «экологичная» и «чистая». Построенная так, чтобы человек не рубил сук, на котором он сидит. Заботился об охране уже сильно поврежденной биосферы.

Несомненно, в будущем параллельно с линией интенсивного развития энергетики получит широкие права гражданства и линия экстенсивная: рассредоточенные источники энергии не слишком большой мощности, но зато с высоким КПД, экологически чистые, удобные в обращении.

## Список использованных источников

### К теме 1

1. Ахмедов Р. Б. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/Р. Б. Ахмедов. – М. : Знание, 1988.
2. Калашников Н. П. Альтернативные источники энергии/Н. П. Калашников. – М. : Знание, 1987.
3. Калинин Ю. Я. Нетрадиционные способы получения энергии/Ю. Я. Калинина, А. Б. Дубинин. – Саратов : СПИ, 1983. – 70 с.
4. Лабунцов Д. А. Физические основы энергетики/Д. А. Дубцова. – М. : Изд-во МЭИ, 2000.
5. Марочек В. И. Пасынки энергетики/В. И. Марочек, С. П. Соловьев. – М. : Знание, 1981. – 64 с.
6. Мировая энергетика: прогноз развития до 2020 г./ пер. с англ. – М. : Энергия, 1980. – 255 с.
7. Муругов В.П., Каргиев В.М. Методология развития автономных энергосистем в сельском хозяйстве с использованием возобновляемых источников энергии/В. П. Муругов, В. М. Каргиев. – СПб., 1993.
8. Нетрадиционные источники энергии. – М. : МЭИ, 1983.
9. Нетрадиционные источники энергии. – М. : Знание, 1985. – 95 с.
10. Нетрадиционные источники энергии : рекоменд. библиогр. обзор/ сост. Л. М. Кузнецова. – М. : Книга, 1984.
11. Проблемы и перспективы развития мировой энергетики. – М. : Знание, 1982. – 48 с.
12. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии/Дж. Твайделл, А. Уэйр ; пер. с англ. – М. Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
13. Энергетика. – Киев : Вищ. шк., 1971.
14. Энергоактивные здания. – М. : Стройиздат, 1988.
15. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха : справ. пособие/ Л. Д. Богуславский, В. И. Ливчак, В. П. Титов [и др.] ; под ред. Л. Д. Богуславского и В. И. Ливчака. – М. : Стройиздат, 1990. – 624 с.
16. Янтовский Е. И. Потoki энергии и эксергии/Е. И. Янтовский. – М. : Наука, 1988. – 144 с.
17. Ресурсные, социально-экономические и экологические аспекты промышленного использования торфа, биомассы и других нетрадиционных возобновляемых источников энергии в России на перспективу до 2020 года / Комитет Государственной Думы по природным ресурсам и природопользованию. – Режим доступа: <http://www.duma.gov.ru/cnature/>.
18. Синюгин В. Ю. Разработка проекта Федерального закона о государственной политике в области возобновляемых источников энергии: вторая попытка / В. Ю. Синюгин, А. Е. Копылов. – ИНТЕРСОЛАРЦЕНТР. – Режим доступа: <http://www.intersolar.ru/>.
19. Поправки к закону о реформировании электроэнергетики поддерживают развитие ВИЭ в России / Интерсоларцентр. – Режим доступа:

- <http://intersolar.ru/news/novosti/policy/846.html>.
20. Ветроэнергетика: опыт и перспективы / ОАО «ГидроОГК». – Режим доступа: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=690](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=690).
  21. Альтернативная энергетика / Официальный сайт Чукотского АО. – Режим доступа: [http://www.chukotka.org/ru/economics/branch/energetics/alternate\\_energetics/](http://www.chukotka.org/ru/economics/branch/energetics/alternate_energetics/).
  22. Фактор ветра. Экономические аспекты формирования системы поддержки использования ВИЭ в России / А.Е. Копылов. – Независимая газета №027 (4269) Среда, 13 февраля 2008. – Режим доступа: [http://www.ng.ru/energy/2007-09-11/16\\_veter.html](http://www.ng.ru/energy/2007-09-11/16_veter.html).
  23. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. – ЗАО «ГУ ИЭС» – Режим доступа: <http://www.energystrategy.ru/projects/energystrategy.htm>
  24. ВИЭ глазами ОАО “Инженерный центр ЕЭС” – Режим доступа: <http://aenergy.ru/1170>.
  25. Итоги развития альтернативной энергетики в мире и в России в 2010 году/ BELLONA. – Режим доступа: [http://www.bellona.ru/articles\\_ru/articles\\_2010/vie-2010](http://www.bellona.ru/articles_ru/articles_2010/vie-2010).

## К теме 2

1. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения/ В. М. Андреев, В. А. Грилихес, В. Д. Румянцев. – Л. : Наука, 1989. – 310 с.
2. Андреев В. М . Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии/В. М. Андреев // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 7. – С. 93–98.
3. Бринкворт Б. Солнечная энергия для человека/Б. Бринкворт ; пер. с англ. В. Н. Оглоблева ; под ред. и предисл. Б. В. Тарнижевского. – М. : Мир, 1976. – 291 с.
4. Мейтин М. Фотовольтаика : материалы, технологии, перспективы/ М. Митин.
5. Фаворский О. Н. Установки для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую/О. Н. Фаворский. – М. : Выс. шк., 1965. – 288 с.
6. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей/Г. Раушенбах ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
7. Разработан новый способ создания тонкоплёночных фотоэлементов. – Режим доступа: <http://energy-fresh.ru/solarenergy/solarbattery/?id=4654>

## К теме 3

1. Богословский В.Н., Сканави А.Н. Отопление : учеб. для вузов/В. Н. Богословский, А. Н. Сканави. – М. : Стройиздат, 1991. – 735 с.
2. ВСН 52-86. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования. – М. : Госгражданстрой, 1988.

3. Теплонасосные гелиосистемы отопления и горячего водоснабжения зданий/М. С. Плешка, П. М. Вырлан, Ф. И. Стратан [и др.]. – Кишинев : Штиинца, 1990. – 122 с.
4. РД 34.20.115-89. Методические указания по расчету и проектированию систем солнечного теплоснабжения. – М. : СПО Союзтехэнерго, 1990.
5. Шершнева В. Солнечные системы теплоснабжения/ В. Шершнева, Н. Дударев// Строительная инженерия. – 2006. – № 1. – <http://www.stroing.ru/>.
6. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха : справ. пособие/ Л. Д. Богуславский, В. И. Ливчак, В. П. Титов [и др.] ; под ред. Л. Д. Богуславского и В. И. Ливчака. – М. : Стройиздат, 1990. – 624 с.
7. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Р. Р. Авезов, М. А. Барский–Зорин, И. М. Васильева [и др.] ; под. ред. Э. В. Сарнацкого и С. А. Чистовича. – М. : Стройиздат, 1990. – 328 с.

#### К теме 4

1. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии/Г. Бекман, П. Гилли ; пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – 272 с.

#### К темам 5–7

1. Фатеев Е. М. Ветро двигатели и ветроустановки/Е. М. Фатеев. – М. : ОГИЗ–Сельхозгиз, 1948. – 544 с.
2. Шефтер Я. И. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты/ Я. И. Шефтер, И. В. Рождественский. – М. : Колос, 1967. – 376 с.
3. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектростанции : учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т» ; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
4. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика : учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т» ; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
5. The American Wind Energy Association. – Режим доступа: <http://www.awea.org>
6. The European Wind Energy Association. – Режим доступа: <http://www.ewea.org>

#### К темам 8–10

1. Дворов И. М. Геотермальная энергетика/И. М. Дворов. – М. : Наука, 1976. – 192 с.
2. ВСН 56-87. Геотермальное теплохладоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. Нормы проектирования. – М. : Стройиздат, 1989.
3. Андрищенко А. И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических



- установок : учеб. пособие для теплоэнергет. спец. вузов/А. И. Андриященко. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1985. – 319 с.
4. Алхасов А. Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии/А. Б. Алхасов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.

### **К темам 11–13**

1. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии/ Дж. Твайделл, А. Уэйр ; пер. с англ. – М. Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
2. Коробков В. А. Преобразование энергии океана/В. А. Коробков. – Л. : Судостроение, 1986. – 280 с.
3. Волновые энергетические станции в океане / В. И. Сичкарев, В. А. Акуличев. – М. : Наука, 1989. – 132 с.
4. Приливные электростанции / Л. Б. Бернштейн, В. Н. Силаков, С. Л. Гельфер [и др.] ; под ред. д-ра техн. наук Л. Б. Бернштейна. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.

### **К темам 14–16**

1. Бойлс Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки/Д. Бойлс. – М. : Агро-промиздат, 1987.
2. Дубровский В. С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов/ В. С. Дубровский, У. Э. Виестур. – Рига : Зинатие, 1988.
3. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии/ Дж. Твайделл, А. Уэйр А. ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
4. А. А. Жосан. Сравнение физико-химических свойств дизельного топлива и рапсового масла / А. А. Жосан, Ю. Н. Рыжов, А. А. Курочкин // Вестник ОрелГАУ. – 2011. – № 4(31). – С. 72–74.

### **К теме 17**

1. Сибикин Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учеб. пособие / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. – М. : КНОРУС, 2010. – 232 с.
2. Баскаков А. П. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебник для вузов / А. П. Баскаков, В. А. Мунц. – М. : Издат. дом «БАСТЕТ», 2013. – 368 с.

### **К теме 18**

1. Васильев Ю. С., Хрисанов Н.И. Экология использования возобновляющихся энергоисточников/ Ю. С. Васильев, Н. И. Хрисанов. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 343 с.