

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

## **НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2019

УДК 620.92(075.8)  
ББК 31.6я73  
Н57

*Составители*

В.Е. Губин, А.А. Матвеева, Д.В. Гвоздяков, С.А. Янковский,  
К.Б. Ларионов, К.В. Слосарский, Я.В. Марышева,  
С.А. Цибульский, А.В. Зенков, С.В. Лавриченко

**Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии :**  
Н57 учебное пособие / сост. : В.Е. Губин, А.А. Матвеева, Д.В. Гвоздяков и др. ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – 152 с.  
ISBN 978-5-4387-0907-7

В пособии изложены основные направления использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в качестве альтернативы традиционной энергетике. Рассмотрены способы преобразования энергии ветра, солнца, воды, биотоплива, водорода, геотермальной энергии в электрическую и тепловую с учетом последних достижений техники и технологий. Отдельное внимание уделено вопросам газогенерирующих установок, динамике потребления энергоресурсов и развитию энергоэффективности, а также экологическим проблемам энергетики.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

УДК 620.92(075.8)  
ББК 31.6я73

*Рецензенты*

Кандидат химических наук  
научный сотрудник Института катализа СО РАН  
*Ю.И. Бауман*

Кандидат технических наук  
заведующий НИЛ «Гибридные наноструктурные материалы»,  
доцент кафедры МиФП НИТУ «МИСиС»  
*А.А. Комиссаров*

ISBN 978-5-4387-0907-7

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2019  
© Составители, 2019  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Энергия – одно из обсуждаемых сегодня понятий, но 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 традиционных природных топлив (нефти, угля, газа и др.) конечны. Ограничены также и запасы ядерного топлива – урана и тория, из которого можно получать в реакторах-размножителях плутоний. Практически неисчерпаемы запасы термоядерного топлива – водорода, однако управляемые термоядерные реакции пока не освоены и неизвестно, когда они будут использованы для промышленного получения энергии в чистом виде, т. е. без участия в этом процессе реакторов деления. Остаются два пути: ресурсосбережение и использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

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.

Ученые со всего мира работают над освоением термоядерной энергии синтеза легких элементов, что дало бы человечеству неограниченные энергоресурсы. Сырьем для этого синтеза является дейтерий – нуклид водорода с атомной массой 2. 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 (потому 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 кВт/м<sup>2</sup>, тогда как в современных котлах и ядерных реакторах достигаются в тысячу раз большие плотности теплового потока. Соответственно, нетрадиционные энергоустановки имеют значительные габариты, металлоемкость, занимают существенные площади по сравнению с действующими ТЭС, АЭС, котельными.

Стратегия развития топливно-энергетического комплекса России предполагает увеличение количества добываемого угля, используемого в основном для энергетики и коксохимической промышленности. Такой прогнозируемый рост добычи неизбежно приведет к значительному увеличению антропогенной нагрузки и ухудшению экологической ситуации. Помимо этого, уголь обладает еще такими недостатками, как высокая доля негорючего балласта и низкая калорийность (низкосортные марки угля). Компенсировать недостатки угольных технологий на объектах тепло- и электроэнергетики позволит процесс газификации твердых топлив на основе углей или смесей с добавлением биомассы. Получаемый при газификации таких топлив (а также других энергоносителей) синтез-газ (как продукта газификации), как показывают исследования ведущих мировых ученых, является более качественным продуктом, содержащим значительно меньше несжигаемого остатка. Процесс трансформации таких топлив в газ является трудоемким как теоретически, так и экспериментально. Сопровождается при этом физико-химическими и термодинамическими процессами, изучение и реализация на практике которых возможно при параллельном теоретическом, экспериментальном исследовании и инженерно-экономическом обосновании с применением численного моделирования механизмов горения, тепломассопереноса и т. д. Анализируя неотъемлемые параллельные задачи прикладного и фундаментального характера, открывается возможность более полного научного исследования газификации.

Технология газификации является универсальным методом для переработки углеродсодержащих материалов и добавок в виде биомассы независимо от их структуры и свойств. В результате взаимодействия газифицирующего агента и газифицируемого материала получается синтез-газ различного состава. В зависимости от состава получаемого газа различают два основных направления его использования: сжигание в энергоустановках; применение в качестве исходного сырья для синтеза различных органических веществ. Экспериментально-теоретические исследования процессов газификации и горения твердых топлив широко проводятся в течение последних десятилетий в России, США, Германии, Италии, Франции, Китае, Индии и других технологически высокоразвитых странах. Приоритет по данной теме, признанный во всем мире, имеется и у таких Российских научных школ, как Томский политехнический университет, Томский государственный университет, Кузбасский государственный технический университет, Институт угля СО РАН, Институт углехимии СО РАН, Институт химии нефти СО РАН, и ряда других организаций. Это связано с промышленным освоением технологии газификации и наличия ведущих экспертов по данной теме в России.

Водород, самый простой и легкий из всех химических элементов, можно считать идеальным топливом. Он имеется всюду, где есть вода. При сжигании водорода образуется вода, которую можно снова разложить на водород и кислород, причем этот процесс не вызывает никакого загрязнения окружающей среды. Водородное пламя не выделяет в атмосферу продуктов, которыми неизбежно сопровождается горение любых других видов топлива: углекислого газа, окиси углерода, сернистого газа, углеводородов, золы, органических перекисей и т. п. Водород обладает очень высокой теплотворной способностью: при сжигании 1 г водорода получается 120 Дж тепловой энергии, а при сжигании 1 г бензина – только 47 Дж.

Водород можно транспортировать и распределять по трубопроводам, как и природный газ. Трубопроводный транспорт топлива – самый дешевый способ дальнейшей передачи энергии. К тому же трубопроводы прокладываются под землей, что не нарушает ландшафта. Газопроводы занимают меньше земельной площади, чем воздушные электрические линии. Передача энергии в форме газообразного водорода по трубопроводу диаметром 750 мм на расстояние свыше 80 км обойдется дешевле, чем передача того же количества энергии в форме переменного тока по подземному кабелю. На расстоянии более 450 км трубопроводный транспорт водорода дешевле, чем воздушная линия электропередачи постоянного тока.

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 этом направлении энергетике сдерживается пока отсутствием платежеспособного спроса. В ближайшем будущем доля НВИЭ в энергетическом балансе России, несомненно, будет увеличиваться.

# 1. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

## 1.1. Традиционные источники энергии

Научно-технический прогресс невозможен без развития энергетики, электрификации. Человечеству нужна энергия, причем потребности в ней увеличиваются с каждым годом. Вместе с тем запасы традиционных природных топлив (нефти, угля, газа и др.) конечны, как и запасы ядерного топлива – урана и тория, из которого можно получать в реакторах-размножителях плутоний.

**Тепловая электростанция (ТЭС)** – электростанция, вырабатывающая электрическую энергию в результате преобразования тепловой энергии (рис. 1.1), выделяющейся при сжигании органического топлива, например попутного нефтяного газа.

На тепловых электростанциях преобразуется химическая энергия топлива сначала в механическую, а затем – в электрическую.



*Рис. 1.1. Сургутская ТЭС-2.*

*Имеет самую большую установленную электрическую мощность среди ТЭС России – 5597 МВт. В качестве основного топлива ТЭС использует попутный нефтяной газ*

Топливом для такой электростанции могут служить уголь, торф, газ, горючие сланцы, мазут. Тепловые электрические станции подразде-

ляют на конденсационные (КЭС), предназначенные для выработки только электрической энергии, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), производящие, кроме электрической, тепловую энергию в виде горячей воды и пара. Крупные КЭС районного значения получили название государственных районных электростанций (ГРЭС).

Тепловые конденсационные электростанции имеют невысокий КПД, так как большая часть энергии теряется с отходящими топочными газами и охлаждающей водой конденсатора.

Наиболее экономичными являются крупные тепловые паротурбинные электростанции. Большинство ТЭС нашей страны используют в качестве топлива угольную пыль. Для выработки 1 кВт·ч электроэнергии затрачивается несколько сот граммов угля. В паровом котле свыше 90 % выделяемой топливом энергии передается пару. В турбине кинетическая энергия струй пара передается ротору. Вал турбины жестко соединен с валом генератора.

**Гидроэлектрическая станция, гидроэлектростанция (ГЭС)** – комплекс сооружений и оборудования, посредством которых энергия потока воды преобразуется в электрическую энергию (рис. 1.2). ГЭС состоит из последовательной цепи гидротехнических сооружений, обеспечивающих необходимую концентрацию потока воды и создание напора, и энергетического оборудования, преобразующего энергию движущейся под напором воды в механическую энергию вращения, которая, в свою очередь, трансформируется в электрическую.



*Рис. 1.2. Саяно-Шуменская ГЭС.*

*Крупнейшая по установленной мощности электростанция России – 6400 МВт*

По установленной мощности (МВт) различают ГЭС мощные (свыше 250), средние (до 25) и малые (до 5). Мощность ГЭС зависит от напора (разности уровней верхнего и нижнего бьефа), расхода воды,



используемого в гидротурбинах, и КПД гидроагрегата. По ряду причин (вследствие, например, сезонных изменений уровня воды в водоёмах, непостоянства нагрузки энергосистемы, ремонта гидроагрегатов или гидротехнических сооружений и т. п.) напор и расход воды непрерывно меняются, а кроме того, меняется расход при регулировании мощности ГЭС. Различают годичный, недельный и суточный циклы режима работы ГЭС.

**Атомная электростанция (АЭС)** – электростанция, в которой атомная (ядерная) энергия преобразуется в электрическую. Генератором энергии на АЭС является атомный реактор (рис. 1.3). Тепло, которое выделяется в реакторе в результате цепной реакции деления ядер некоторых тяжёлых элементов, затем так же, как и на обычных тепловых электростанциях (ТЭС), преобразуется в электроэнергию. В отличие от ТЭС, работающих на органическом топливе, АЭС работает на ядерном горючем (в основе  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ). При делении 1 г изотопов урана или плутония высвобождается 22 500 кВт·ч, что эквивалентно энергии, содержащейся в 2800 кг условного топлива.



*Рис. 1.3. Балаковская АЭС*

Наиболее часто на АЭС применяют четыре типа реакторов на тепловых нейтронах: водо-водяные с обычной водой в качестве замедлителя и теплоносителя; графито-водяные с водяным теплоносителем и графитовым замедлителем; тяжеловодные с водяным теплоносителем и тяжелой водой в качестве замедлителя; графито-газовые с газовым теплоносителем и графитовым замедлителем.

Выбор преимущественно применяемого типа реактора определяется главным образом накопленным опытом в реакторостроении, а также наличием необходимого промышленного оборудования, сырьевых зап-

сов и т. п. В России строят главным образом графито-водные и водо-водные реакторы. На АЭС США наибольшее распространение получили водо-водные реакторы. Графито-газовые реакторы применяются в Англии. В атомной энергетике Канады преобладают АЭС с тяжеловодными реакторами.

В высокотемпературных графито-газовых реакторах возможно применение обычного газотурбинного цикла. Реактор в этом случае выполняет роль камеры сгорания.

Экономичность АЭС определяется её основными техническими показателями: единичной мощностью реактора, энергонапряжённостью активной зоны, глубиной выгорания ядерного горючего, коэффициентом использования установленной мощности АЭС за год. С ростом мощности АЭС удельные капиталовложения снижаются более резко, чем это имеет место для ТЭС. В этом главная причина стремления к сооружению крупных АЭС с большой единичной мощностью блоков.

Значительных недостатков АЭС при нормальных условиях функционирования практически не имеют. Однако нельзя не заметить опасность АЭС при возможных форс-мажорных обстоятельствах (землетрясениях, ураганах и т. п.) здесь старые модели энергоблоков представляют потенциальную опасность радиационного заражения территорий.

## **1.2. 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 в недалеком будущем 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 в этом ее отличительный признак.

*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.

### Вопросы и задания к главе 1

1. Что относится к нетрадиционным источникам энергии?
2. Что относится к возобновляемым источникам энергии?
3. Что относится к невозобновляемым источникам энергии?
4. Перечислите типы традиционных источников энергии.
5. В чем заключаются основные достоинства и недостатки различных типов традиционных источников?
6. Приведите классификацию тепловых электрических станций.
7. Приведите классификацию гидроэлектростанций.
8. Какие существуют типы ядерных реакторов?
9. Какие перспективы использования возобновляемых источников энергии?
10. Приведите классификацию возобновляемых источников энергии, их достоинства и недостатки.
11. Какие виды возобновляемых источников энергии актуальны применительно к условиям России?

## 2. ЗАПАСЫ И РЕСУРСЫ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

На протяжении тысячелетий основными видами используемой человеком энергии были химическая энергия древесины, потенциальная энергия воды на плотинах, кинетическая энергия ветра и лучистая энергия солнечного света.

Необходимая потребность в энергии относительно вида топлива представлена на рис. 2.1.

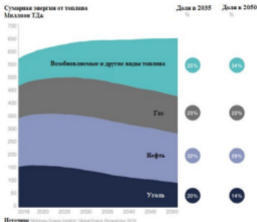


Рис. 2.1. Динамика изменения в структуре первичного потребления энергии (2016–2050)

Очевидно, сократится потребление угля, а вот нефтегазовый сектор будет наслаждаться стабильным спросом. В результате такой «энергетической трансформации» декарбонизация мировой энергетики получится довольно умеренной. Глобальные выбросы достигнут пика в 2024 г. и снизятся примерно на 20 % за 2016–2050 гг.

**Запасы нефти и природного газа.** Трудно точно рассчитать, на сколько лет еще хватит запасов нефти. Если существующие тенденции сохранятся, то годовое потребление нефти в мире к 2018 г. достигнет 3 млрд т. Даже допуская, что промышленные запасы существенно возрастут, геологи приходят к выводу, что к 2030 г. будет исчерпано 80 % разведанных мировых запасов нефти.

Запасы нефти представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

*Мировые запасы нефти (ориентировочные данные), млрд т*

Регион	Разведанные запасы	Промышленные запасы
Ближний Восток	82	50
Страны СНГ	51	10
Африка	34	7,5
Латинская Америка	31	9,5
Дальний Восток и Океания	27	3
США	27	4
Китай	17	3
Канада	13	1
Западная Европа	3	3
<b>Всего</b>	<b>285</b>	<b>91</b>

**Запасы угля** оценить легче (табл. 2.2). Три четверти его мировых запасов, составляющих по приближенной оценке, 10 трлн т, приходится на страны бывшего СССР, США и КНР.

Таблица 2.2

*Мировые запасы каменного угля (ориентировочные данные), млрд т*

Регион	Запасы
Страны СНГ	4400
США	1570
Китай	1570
Западная Европа	865
Океания	800
Африка	225
Азия (без стран СНГ и Китая)	185
Канада	65
Латинская Америка	60
<b>Всего</b>	<b>9740</b>

Хотя угля на Земле гораздо больше, чем нефти и природного газа, его запасы не безграничны. В 1990-х годах мировое потребление угля

составляло более 2,3 млрд т в год. В отличие от потребления нефти, потребление угля существенно увеличилось не только в развивающихся, но и в промышленно развитых странах. По существующим прогнозам запасов угля должно хватить еще на 420 лет. Но если потребление будет расти нынешними темпами, то его запасов не хватит и на 200 лет.

Разведанные запасы местных месторождений угля, нефти и газа в России составляют 8,7 млрд т. у. т., торфа – 10 млрд т. у. т.

Вероятным направлением выхода из энергетического кризиса может быть ядерная энергетика.

В последнее время очень актуальна тематика альтернативных источников энергии. Наиболее перспективным из них представляется солнечная энергия.

У солнечной энергии есть два основных преимущества. Во-первых, ее много и она относится к возобновляемым энергоресурсам: длительность существования Солнца оценивается приблизительно в 5 млрд лет. Во-вторых, ее использование не влечет за собой нежелательных экологических последствий.

Однако использованию солнечной энергии мешает ряд трудностей. Хотя полное количество этой энергии огромно, она неконтролируемо рассеивается. Чтобы получать большие количества энергии, требуются коллекторные поверхности большой площади. Кроме того, возникает проблема нестабильности энергоснабжения: солнце не всегда светит. Даже в пустынях, где преобладает безоблачная погода, день сменяется ночью. Следовательно, необходимы накопители солнечной энергии. И наконец, многие виды применения солнечной энергии еще как следует не апробированы и их экономическая рентабельность не доказана.

Другим перспективным альтернативным источником является геотермальная энергия. Геотермальная энергия, т. е. теплота недр Земли, уже используется в ряде стран, например в Исландии, России, Италии и Новой Зеландии. Земная кора толщиной 32...35 км значительно тоньше лежащего под ней слоя – мантии, простирающейся примерно на 2900 км к горячему жидкому ядру. Основным недостатком геотермальной энергии является то, что ее ресурсы локализованы и ограничены, если изыскания не показывают наличия значительных залежей горячей породы или возможности бурения скважин до мантии.

Традиционным возобновляемым источником энергии является гидроэнергетика. Гидроэнергетика дает почти треть электроэнергии, используемой во всем мире. Норвегия, где электроэнергии на душу населения больше, чем где-либо еще, живет почти исключительно гидроэнергией.

На гидроэлектростанциях (ГЭС) и гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС) используется потенциальная энергия воды, накапливаемой с помощью плотин.

Наиболее применимым альтернативным источником является ветроэнергетика. Исследования, проведенные Национальной научной организацией США и НАСА, показали, что в США значительные количества ветроэнергии можно получать в районе Великих озер, на Восточном побережье и особенно на цепочке Алеутских островов. Максимальная расчетная мощность ветровых электростанций в этих областях может обеспечить 12 % потребности США в электроэнергии.

Вероятным энергетическим ресурсом являются твердые отходы и биомасса. Примерно половину твердых отходов составляет вода. Легко собрать можно лишь 15 % мусора.

На биомассу – древесину и органические отходы – приходится около 14 % полного потребления энергии в мире. Биомасса – обычное бытовое топливо во многих развивающихся странах.

Потенциальные возможности нетрадиционных и возобновляемых источников энергии составляют в год:

- энергии Солнца – 2300 млрд т. у. т.;
- энергии ветра – 26,7 млрд т. у. т.;
- энергии биомассы – 10 млрд т. у. т.;
- тепла Земли – 40 000 млрд т. у. т.;
- энергии малых рек – 360 млрд т. у. т.;
- энергии морей и океанов – 30 млрд т. у. т.;
- энергии вторичных низкопотенциальных источников тепла – 530 млрд т. у. т.

Разведанные запасы местных месторождений угля, нефти и газа в России составляют 8,7 млрд т. у. т., торфа – 10 млрд т. у. т.

По имеющимся оценкам технический потенциал ВИЭ в России составляет порядка 4,6 млрд т. у. т. в год, что превышает современный уровень энергопотребления России, составляющий около 1,2 млрд т. у. т. в год. Экономический потенциал НВИЭ определен в 270 млн т. у. т. в год, что составляет около 25 % от годового внутрироссийского потребления. В настоящее время экономический потенциал ВИЭ существенно увеличился в связи с подорожанием традиционного топлива и удешевлением оборудования возобновляемой энергетики за прошедшие годы.

## **Вопросы и задания к главе 2**

1. Какие существуют типы ископаемых теплоносителей?
2. Какова величина запасов ископаемых теплоносителей?
3. Перечислите типы возобновляемых энергоресурсов.
4. Где в России целесообразно расположение объектов нетрадиционной и возобновляемой энергетики?
5. Приведите динамику развития генерирующих мощностей на базе возобновляемых источников энергии.

### **3. ДИНАМИКА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Рождение энергетики произошло несколько миллионов лет тому назад, когда люди научились использовать огонь. Огонь давал им тепло и свет, был источником вдохновения и оптимизма, оружием против врагов и диких зверей, лечебным средством, помощником в земледелии, консервантом продуктов, технологическим средством и т. д.

В современном мире производство и потребление энергии в стране принципиально характеризуют степень ее технологического развития, возможный уровень бытового раскрепощения человека, комфорта его жизни, а также защищенность среды его обитания. Суммарное производство энергоресурсов является существенным показателем, но не менее важны структура энергоресурсов, тенденции роста их производства.

Вырисовывается тенденция падения роста производства энергоресурсов, что объясняется двумя факторами: во-первых, истощением запасов, во-вторых, снижением спроса. Снижение спроса на энергоресурсы в развитых странах не связано с уменьшением валового национального продукта (ВВП). Снижение производства твердого топлива, характерное для всех стран, объясняется истощением запасов и экологическими недостатками технологии его использования. Значительное снижение роста производства нефти в Европе объясняется истощением запасов.

Газ сегодня является основным топливом для энергетики всех развитых стран. В России добыча газа продолжает увеличиваться даже в обстановке жесточайшего кризиса, так как это едва ли не единственный источник экспорта, не требующий значительных капиталовложений.

Темпы роста производства электроэнергии в странах Северной Америки, Европы и в Японии несколько замедляются, но при условии сохранения темпов роста ВВП такая тенденция является прогрессивной и отражает снижение энергоемкости национального продукта.

По производству и потреблению первичных энергоресурсов на душу населения Россия устойчиво занимает первое место среди развитых стран. В видимой перспективе этот показатель еще должен увеличиться при освоении уже открытых месторождений газа на Таймыре и в Северной Якутии.

Энергетическая составляющая в производстве большинства товаров развитых стран не превышает 4...5 % от полной себестоимости товара, тогда как в России эта величина обычно не ниже 20 %, а для от-



дельных товаров превышает 50 % при современной заниженной стоимости энергетических ресурсов.

Начавшийся переход к постиндустриальному обществу, где в основном удовлетворены названные выше первичные жизненные нужды людей, позволит сдерживать развитие и даже свертывать энергоемкие отрасли (металлургия, производство строительных материалов и др.), которые были основой индустриального общества. На смену им придут высокотехнологичные производства, для которых основными ресурсами служат не энергия и сырье, а знания. Наряду с этим повышение эффективности преобразования и конечного использования энергии, благодаря новым технологическим и управленческим решениям, уже внесло серьезный вклад в замедление роста энергопотребления и еще сильнее повлияет на него в будущем.

На рис. 3.1 представлена динамика мирового потребления первичных энергоресурсов в зависимости от вида источника.

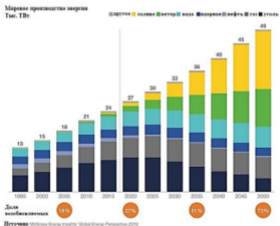


Рис. 3.1. Динамика мирового потребления первичных энергоресурсов в зависимости от вида источника, тыс. ТВт

В полном соответствии с духом времени энергетическая стратегия России провозглашает главным приоритетом значительное повышение энергетической эффективности экономики, справедливо считая это вопросом не только развития, а выживания страны. Дело в том, что по энергоёмкости ВВП (расход энергии на единицу ВВП, пересчитанный для сопоставления с другими странами в доллары по паритету покупательной способности рубля) Россия находится в последней десятке стран мира: его величина в 2,3 раза больше среднемирового значения и в 3,5 раза выше, чем в Евросоюзе.

Средством для повышения энергетической эффективности станет массовая реализация организационных и технологических мер энергосбережения, которая должна обеспечить от четверти до трети среднегодового прироста ВВП. Для этого Россия располагает огромным потенциалом энергосбережения, составляющим 40...45 % ее современного энергопотребления. Реализация освоенных в отечественной и мировой практике мер экономии энергоресурсов способна уменьшить современный их расход в стране на 40...45 %.

Около трети этого потенциала экономии имеют отрасли ТЭК, другая треть сосредоточена в остальных отраслях промышленности и в строительстве, свыше четверти – в коммунально-бытовом секторе, 6...7 % – в транспорте и 3 % – в сельском хозяйстве. Например, реализация технологического потенциала энергосбережения потребовала от 10 до 17 млрд долл. целевых инвестиций до 2010 г. и еще 35...50 млрд – в следующее десятилетие. Создание реальных стимулов реализации экономически эффективной части потенциала энергосбережения будет определяться проводимой в стране ценовой и налоговой политикой.

И только около четверти экономического роста предполагается обеспечивать путем увеличения потребления энергоресурсов. Интенсивнее наращивать потребление энергии в первое десятилетие не позволяет производственная база.

В следующее десятилетие можно сделать больше, но это будет настолько дорого, что развитие станут сдерживать уже экономические факторы, а не ограничения энергоснабжения.

По прогнозам специалистов, потребление первичной энергии в России вырастет к 2020 г. на 27 % в умеренном и на 40 % в оптимистическом сценариях, а в отношении самого универсального и высококачественного энергоносителя – электроэнергии – соответственно на 37 и 49 %. В сочетании с прогнозируемым уменьшением населения страны это приведет к росту душевого потребления первичной энергии на 40...45 % (электроэнергии – на 50...60 %).

Изменения динамики энергопотребления сопровождаются серьезными трансформациями всей производственной структуры энергетики.

В перспективе неизбежно замещение новыми энергоресурсами, и, судя по сложившимся тенденциям, это будет энергия деления урана сначала в тепловых и затем в быстрых реакторах, а за ними – термоядерный синтез.

Тенденция к диверсификации наиболее отчетливо проявилась в последние годы в энергетике развитых стран и регионов, особенно в Северной Америке. За последние 30 лет здесь практически выровнялись доли производства основных видов органического топлива – нефти, газа и угля. Одновременно, хотя и на гораздо более низком уровне, сравнялись доли производства возобновляемых ресурсов – гидроэнергии, биомассы (включая дрова и отходы) – и новых способов использования таких традиционных ресурсов, как ветер и солнце. Важно также, что совокупность возобновляемых ресурсов достигла доли атомной энергии и в сумме с ней вплотную приблизилась к доле каждого из основных видов топлива.

Доля газа в топливоснабжении наиболее квалифицированных потребителей значительно меньше, чем на электростанциях и в котельных, которые, по сути, могут сооружаться для работы на любых, в том числе самых низкокачественных видах топлива.

Напряженность положения показывает сравнение с Европейским союзом. Он ограничивает 30%-м значением поступление любого ресурса из одного источника, а Европейская часть России (включая Урал) получает 75 % топлива из одного источника с дальностью транспортировки до 3000 км: из Сибири сюда ежегодно завозится почти миллиард тонн топлива. Ситуацию нужно менять, хотя это очень дорого, поскольку вместо самого привлекательного для потребителей и экологически чистого топлива – газа – придется использовать уголь и ядерную энергию.

С учетом прогнозов внутреннего спроса и экспорта энергоресурсов рациональная динамика использования запасов топлива определена в стратегии оптимизации энергетического баланса страны в разрезе отраслей и регионов. При этом динамика добычи каждого вида топлива зависит от возможных объемов и стоимости прироста его разведанных запасов, цены реализации на внутренних и внешних рынках, а главное – от темпов роста его цены с увеличением объемов производства. Системный анализ представленной информации с расчетом равновесия между ценами производства, транспортировки и использования каждого энергоресурса позволил определить такое развитие их добычи, переработки и распределения, которое согласуется с коммерческими интересами участников рынка и наиболее эффективно обеспечивает внутренний спрос и экспорт энергоресурсов.

Сама энергетика будет все больше интегрироваться с основными потребителями, постепенно встраиваясь в единые технологические це-

почки, сориентированные на производство конечного потребительского продукта. Начало этому процессу положено созданием смешанных (угольно- и энергометаллургических, газохимических и т. п.) компаний. Снова начнут развиваться территориально-производственные комплексы, ядром которых станут энергетические производства, использующие малотранспортабельные, но богатые по запасам местные энергоресурсы – lignиты, гидроресурсы, биомассу и др.

Расширяющаяся системная среда стимулирует такие традиционные направления научно-технического прогресса, как рост единичной мощности энергетических объектов и пропускных способностей связей для удешевления добычи (преобразования) и распределения энергии; повышение используемых в энергетике температур и давлений; концентрация и интенсификация потоков энергии; рост автоматизации и точности управления энергетическими процессами (от горизонтального бурения скважин до обеспечения надежности и оптимизации режимов работы континентальных энергетических систем); использование гигантских объемов информации (от горно-геологических характеристик месторождений топлива до параметров энергетического оборудования потребителей) и др. Но еще более важно, что развитие энергетических систем активно способствует созданию качественно новой энергетики – сверхпроводящих электрических генераторов, накопителей и линий электропередачи, термоядерной энергетики и т. д.

Одновременно набирали силу новые направления научно-технического прогресса, возрождающие на новой технологической основе индивидуальное энергоснабжение человека (семьи) в быту и малом бизнесе с вытеснением архаичных индивидуальных энергоустановок и все большей независимостью от систем централизованного энергоснабжения.

Начало этому положила массовая автомобилизация населения сначала США, а затем и других стран, сочетавшаяся с распространением грузовых автомобилей, тракторов и других мобильных машин и механизмов индивидуального применения.

Автономности потребителей способствует распространение дизельных и газотурбинных установок средней и малой мощности, высокоинтенсивных теплогенераторов и других средств электро- и теплоснабжения отдельных домов и малых предприятий. Ведутся интенсивные разработки топливных элементов для прямого преобразования химической энергии топлива (водорода и метана) в электроэнергию, а также разнообразных аккумуляторов электроэнергии, в том числе с использованием эффекта сверхпроводимости. На этой основе впоследствии удастся создать мощную и экономичную техническую базу для дальнейшей индивидуализации энергоснабжения с сильным воздействием на расселение людей.

Индивидуальная энергетика обычно обеспечивает более экономное использование энергии, но обслуживающая человека суммарная установленная мощность энергоустановок при этом значительно увеличивается. Такой обмен большей установленной мощности на меньшее энергопотребление может стать реальной основой более энергоэкономного стиля жизни и стабилизации (если не снижения) душевого энергопотребления. Одновременно это станет благом для окружающей среды, поскольку каждый человек стремится, чтобы контролируемые им энергетические процессы минимально портили среду его обитания. Кроме того, индивидуальный пользователь будет заботиться о безопасности окружающей его энергосферы, предъявляя оптимальные требования к надежности и защищенности энергетического оборудования.

С учетом рассмотренной новой мировой тенденции российская энергетика должна сочетать совершенствование своих уникальных энергосистем с опережающим развитием индивидуальной энергетики. Для страны с самой большой в мире и крайне неравномерно заселенной территорией переход от отопительных печей и простейших дизель-генераторов к передовым индивидуальным энергоприборам и установкам позволит выровнять условия энергообеспечения людей, стирая прословутую разницу между городом и деревней. Это задача большого социального и экологического значения.

### **Вопросы и задания к главе 3**

1. Перечислите основные тенденции развития мировой энергетики.
2. В чем заключается особенность развития российской энергетики?
3. Опишите динамику потребления газа в России и в мире.
4. Опишите динамику потребления нефти в России и в мире.
5. Опишите динамику потребления угля в России и в мире.

## 4. МЕСТО НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ В УДОВЛЕТВОРЕНИИ ПОТРЕБНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

Сегодня в мире использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии достигло промышленного уровня, опутного в энергобалансе ряда стран. Масштабы применения НВИЭ в мире непрерывно и интенсивно возрастают. Это направление является одним из наиболее динамично развивающихся среди других направлений в энергетике.

Государственная техническая политика, направленная на развитие НВИЭ, реализуется в этих странах через систему законодательных и нормативных актов, которыми (при всем их разнообразии в различных странах) устанавливаются некоторые, общие для всех, принципиальные положения, составляющие правовую, экономическую и организационную основу применения НВИЭ.

*Правовая основа:* право производителей электроэнергии на основе НВИЭ на подключение к сетям энергоснабжающих компаний при обязанности последних покупать эту электроэнергию.

*Экономическая основа:* различные экономические льготы (налоговые и кредитные льготы, благоприятные тарифы, дотации и т. п.) производителям и потребителям электроэнергии от НВИЭ, что необходимо на начальном этапе для становления и адаптации на рынке.

*Организационная основа:* разработка государственных программ поддержки НИОКР в области НВИЭ, финансирование за счет федерального и региональных бюджетов ряда практических мероприятий по использованию НВИЭ.

Научно-исследовательские работы и практические меры по использованию НВИЭ в России в настоящее время сталкиваются с рядом трудностей общего и частного порядка. Общие причины состоят в кризисном положении экономики страны в целом: падении производства, отсутствии средств на инвестиции, снижении платежеспособного спроса, резком сокращении НИОКР с угрозой потери научно-технического потенциала. Все это в полной мере касается и сферы использования НВИЭ.

Дополнительные трудности в развитии этого направления состоят в следующем. Как правило, эксплуатационные затраты для установок на НВИЭ ниже, а капиталовложения выше, чем для традиционных энергоустановок. Этот фактор связан с природой используемых источников

энергии и не зависит от состояния экономики, но в существующих кризисных условиях играет существенную негативную роль. Кроме этого, в условиях значительного падения объема промышленного производства существенно снизилось и энергопотребление, вследствие чего в целом нет острой потребности в изыскании и использовании новых источников энергии, хотя на региональном уровне в районах Севера и других энергетически дефицитных районах такая потребность имеется.

Рассмотрим перспективы развития нетрадиционных электростанций по видам используемых НВИЭ.

#### *Геотермальные электростанции*

ГеотЭС на парогидротермах географически «привязаны» к районам парогидротермальных месторождений (Камчатка, Курилы). Поэтому в целом в энергетике России этот вид ГеотЭС не может играть значительной роли, но для указанных районов они могут почти полностью удовлетворить потребности в электроэнергии. Гораздо большее распространение в электроэнергетике России могут получить ГеотЭС не на парогидротермах, а на термальной воде с температурой 100...200 °С, месторождения которой значительно более распространены. Такая ГеотЭС должна быть двухконтурной, с низкокипящим рабочим телом во втором контуре. Однако эти ГеотЭС, в отличие от парогидротермальных, требуют опытно-промышленного освоения для отработки этой технологии и достижения коммерческой привлекательности.

#### *Ветроэлектростанции*

Если к настоящему времени мировая системная ветроэнергетика превратилась в отрасль электроэнергетики, вносящую в отдельных странах ощутимую долю в производство электроэнергии, то практическое развитие ветроэнергетики в России находится на начальном этапе. Разработано несколько типов ветроэлектроустановок (ВЭУ). Установлены и находятся в опытно-промышленной эксплуатации до 10 ВЭУ мощностью 250 кВт и одна – мощностью 1 МВт.

Незавершенность стадии опытно-промышленных испытаний созданных ВЭУ, отсутствие достаточного опыта эксплуатации многоагрегатных ВЭС затрудняют ответ на вопрос, могут ли разработанные ВЭУ являться серийными образцами или требуется их существенная доработка.

#### *Солнечные электростанции*

Перспективы развития солнечных электростанций (СЭС) также являются неопределенными вследствие их сегодняшней неэкономич-

ности. Вместе с тем только на лабораторном уровне без достаточно масштабного эксперимента, т. е. без создания экспериментальных и опытно-промышленных СЭС мегаватной мощности, как фотоэлектрических, так и термодинамических, не возможны отработка технологий солнечной электроэнергии и определение путей повышения их технико-экономических показателей. С этой точки зрения целесообразно вернуться к разработке Кисловодской экспериментальной фотоэлектростанции мощностью 1 МВт, по которой уже выполнены некоторые проектные проработки.

#### *Приливные электростанции*

Несколько особняком от других нетрадиционных электростанций находятся приливные электростанции (ПЭС). Если ГеоТЭС, ВЭС и СЭС являются по преимуществу модульными, мощность их относительно невелика и может наращиваться постепенно, то мощность предполагаемых к созданию в России ПЭС исключительно велика (Тугурская ПЭС на Охотском море мощностью 7800 МВт, Меленская на Белом море мощностью 19 200 МВт), а количество их агрегатов исчисляется сотнями. Огромная мощность этих ПЭС требует чрезвычайно больших капитальных вложений как непосредственно в строительство ПЭС, так и на мероприятия, необходимые для адаптации в энергосистеме ПЭС с переменной мощностью в суточном цикле. Сроки строительства этих гигантских сооружений также весьма велики. Все это отодвигает создание указанных ПЭС в России по крайней мере до того времени, когда экономика страны позволит приступить к проектам такого масштаба.

#### *Малые гидроэлектростанции*

Малые гидроэлектростанции (МГЭС) с единичной мощностью агрегата от 0,1 до 10 МВт и суммарной мощностью до 30 МВт также обычно относят к НВИЭ. По отчетным данным в 1990 г. в России оставалось в эксплуатации 55 МГЭС суммарной мощностью 545 МВт. Практически все эти МГЭС находятся в Европейской части России.

Основные направления развития малой гидроэнергетики на ближайшие годы следующие:

- строительство малых ГЭС при сооружаемых комплексных гидроузлах;
- модернизация и восстановление ранее существовавших МГЭС;
- сооружение МГЭС на существующих водохранилищах и малых реках, на имеющихся перепадах на каналах и трубопроводах подвода и отвода воды на объектах различного хозяйственного назначения.



### *Газификация твердых топлив*

По современным оценкам программу развития технологии газификации можно считать уникальной и долгосрочной. В настоящее время в России определены три основных направления использования газификации:

- газификация низкосортных, в первую очередь сернистых углей, и сжигание очищенных газов на тепловых электростанциях;
- производство заменителей природного газа, используемого как в промышленном, энергетическом, так и бытовом секторах народного хозяйства;
- газификация с целью получения синтез-газа (смеси CO и H<sub>2</sub>), водорода и других восстановительных газов для химической промышленности.

Газификация угля и смесевых топлив на его основе охватывает широкий спектр технологических схем, которые можно классифицировать по разработанным технологическим системам, характеру движения газифицируемого топлива, типу дутья газифицируемого агента, теплоте сгорания, получаемого газа и его назначению, температуре и давлению процесса газификации и другим параметрам.

По характеру движения газифицируемого топлива в большинстве случаев различают газификацию твердого топлива в плотном слое, кипящем слое и потоке.

По типу дутья газифицируемого агента: воздушное, паровоздушное, кислородное, парокислородное, паровое.

По теплоте сгорания получаемых газов (в МДж/м<sup>3</sup>): с низкой (от 4,2 до 6,7), средней (от 6,7 до 31) и высокой (от 31 до 40) теплотой сгорания.

По назначению: для энергетических (непосредственного сжигания) и технологических (синтез, производство водорода, технического углерода) целей.

По температуре газификации: низкотемпературная (до 800 °С), среднетемпературная (от 800 до 1300 °С) и высокотемпературная (выше 1300 °С).

Следует отметить, что при воздушной (или паровоздушной) газификации образуется воздушный (или полуводяной) газ с низкой теплотой сгорания (от 4 до 7 МДж/м<sup>3</sup>). Такой газ целесообразно использовать непосредственно на месте его получения без транспортировки на значительные расстояния.

При кислородной (или парокислородной) газификации (под давлением до 3 МПа) получают синтез-газ со средней теплотой сгорания

от 10 до 16 МДж/м<sup>3</sup>. Его можно использовать как вблизи места получения, так и транспортировать, а также применять в качестве исходного сырья для производства углеводородных соединений.

Газ с высокой теплотой сгорания (или заменитель природного газа) получают в результате кислородной (или парокислородной) газификации угля под высоким давлением (свыше 10 МПа) или в результате переработки синтез-газа. Теплота сгорания такого газа составляет от 20 до 40 МДж/м<sup>3</sup>.

Актуальные технологические схемы газификации угля:

- в плотном слое – по методу Lurgi, BritishGasLurgi, Ruhr 100;
- в кипящем слое – по методу Winkler, U-gas, HTW, KBR;
- в потоке – по методу Koppers-Totzek (KT), ShellSCGP, Noell, Texaco, E-Gas, ССР, Eagle.

Водородная энергетика – это направление выработки и потребления энергии человеком, который базируется на использовании водорода в качестве средства для аккумуляирования, транспортировки и потребления энергии населением, транспортом и различными производственными направлениями. Водород выбран как наиболее распространенный элемент на поверхности Земли и в космосе, он имеет наибольшую энергоемкость, а продуктом его сгорания является только вода, вновь вводится в оборот. Термин «водородная энергетика» был предложен Джоном Бокрисом во время лекции, которую он прочитал в 1970 г. в Техническом центре General Motors (GM). Водород может быть использован как топливо для любых транспортных средств (в том числе, легковых автомобилей и катеров), а также для удовлетворения энергетических потребностей зданий (приборы для непрерывного питания) и качестве питания для бытовой техники. Водорода в чистом виде в природе почти нет, поэтому его нужно производить в процессе электролиза воды или иным способом. Сокращение выбросов диоксида углерода связано с использованием водородного топлива, достигается благодаря топливным элементам высокой эффективности. При условии обеспечения производства водорода энергией, полученной из углеродных источников, выбросов диоксида углерода нет совсем. Водород можно производить из возобновляемых ресурсов, а также можно использовать для хранения энергии из непостоянных источников.

Децентрализованное энергообеспечение на основе НВИЭ находит в мире широкое распространение, а его суммарный энергетический эффект не меньше того, который достигнут в сфере централизованного энергоснабжения.

#### Вопросы и задания к главе 4

1. В чем заключается движущая сила развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии?
2. Опишите динамику развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в РФ.
3. Что является основой для развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в настоящее время?
4. Перечислите основные направления развития нетрадиционной энергетики в России.
5. Какие факторы усложняют внедрение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в энергетику России?
6. Перечислите основные недостатки существующих в России нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.
7. Чем обоснован экономический эффект от внедрения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии?
8. Перечислите и опишите методы газификации твердых топлив.
9. В чем заключается основное преимущество водородной энергетики в сравнении с традиционными источниками энергии?

## 5. ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА

### 5.1. Источник солнечного излучения, его интенсивность и определение потенциала использования

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

Солнце излучает в окружающее пространство поток мощности, эквивалентный  $4 \cdot 10^{25}$  кВт. Вследствие реакций ядерного синтеза в активном ядре Солнца достигаются температуры до  $10^7$  К, спектральное распределение потока излучения из ядра неравномерно. Это излучение поглощается внешними неактивными слоями, в результате чего спектральное распределение солнечного излучения становится относительно непрерывным.

Солнечное излучение на поверхность Земли зависит от многих факторов:

- широты и долготы местности;
- географических и климатических особенностей;
- состояния атмосферы;
- высоты Солнца над горизонтом;
- размещение приемника солнечного излучения на Земле;
- размещение приемника солнечного излучения по отношению к Солнцу и т. д.

В целом можно выделить как закономерные особенности солнечного излучения, так и существенную долю его случайной составляющей. Суммарное солнечное излучение, достигающее поверхности Земли, обычно состоит из трех составляющих:

- 1) прямое солнечное излучение, поступающее от Солнца на приемную площадку в виде параллельных лучей;
- 2) диффузионное или рассеянное молекулами атмосферных газов и аэрозолей солнечное излучение;
- 3) отраженная земной поверхностью доля солнечного излучения.

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

на Земле составляет более 3600 часов в год. За год на всю территорию России поступает солнечной энергии больше, чем энергии от всех российских ресурсов нефти, газа, угля и урана.

## 5.2. Перспективы использования энергии Солнца

В последнее время интерес к проблеме использования солнечной энергии резко возрос. Потенциальные возможности энергетики, основанной на использовании непосредственно солнечного излучения, чрезвычайно велики. Заметим, что использование всего лишь 0,0125 % этого количества энергии Солнца могло бы обеспечить все сегодняшние потребности мировой энергетики, а использование 0,5 % – полностью покрыть потребности на перспективу. К сожалению, вряд ли когда-нибудь эти огромные потенциальные ресурсы удастся реализовать в больших масштабах.

Солнечная энергетика относится к наиболее материалоемким видам производства энергии. Крупномасштабное использование солнечной энергии влечет за собой гигантское увеличение потребности в материалах, а следовательно, и в трудовых ресурсах для добычи сырья, его обогащения, получения материалов, изготовления гелиостатов, коллекторов, другой аппаратуры, их перевозки.

Быстрое развитие гелиоэнергетики стало возможным благодаря снижению стоимости фотоэлектрических преобразователей в расчете на 1 Вт установленной мощности с 1000 долл. в 1970 г. до 3...5 долл. в 1997 г. и повышению их КПД с 5 до 18 %. Уменьшение стоимости солнечного Ватта до 50 центов позволит гелиоустановкам конкурировать с другими автономными источниками энергии, например с дизельными электростанциями.

Одним из лидеров практического использования энергии Солнца стала Швейцария. Здесь построено примерно 2600 гелиоустановок на кремниевых фотопреобразователях мощностью от 1 до 1000 кВт и солнечных коллекторных устройств для получения тепловой энергии. Программа, получившая наименование «Солар-91» и осуществляемая под лозунгом «За энергонезависимую Швейцарию!», вносит заметный вклад в решение экологических проблем и энергетическую независимость страны, импортирующей сегодня более 70 % энергии.

Опыт эксплуатации свидетельствует о том, что Солнце уже в состоянии обеспечить энергопотребности по меньшей мере всех жилых зданий в стране. Гелиоустановки, располагаясь на крышах и стенах зданий, на шумозащитных ограждениях автодорог, на транспортных и промышленных сооружениях, не требуют для размещения дорогостоящей сельскохозяйственной или городской территории.

Таким образом, в мире уже сегодня солнечная энергетика весьма интенсивно развивается и занимает заметное место в топливно-

энергетическом комплексе ряда стран. Принимаются на государственном уровне законы, которые дают существенную поддержку развитию солнечной энергетики. Без принятия указанных законодательных актов использование энергии Солнца было бы практически невозможно, особенно на начальных этапах становления.

### **5.3. Классификация солнечных энергетических установок**

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

- по виду преобразования солнечной энергии в другие виды энергии – тепло или электричество;
- по концентрированию энергии – с концентраторами и без концентраторов;
- по технической сложности – простые (нагрев воды, сушилки, нагревательные печи, опреснители и т. д.) и сложные.

Сложные солнечные энергетические установки можно разделить на два подвида.

*Первый* базируется в основном на системе преобразования солнечного излучения в тепло, которое далее чаще всего используется в обычных схемах тепловых электростанций. К таким установкам относятся башенные солнечные электрические станции, солнечные пруды, солнечные энергетические установки с параболическими концентраторами. Сюда же относятся и солнечные коллекторы, в которых происходит нагрев воды с помощью солнечного излучения.

*Второй* подвид солнечных энергетических установок базируется на прямом преобразовании солнечного излучения в электроэнергию с помощью солнечных фотоэлектрических установок.

В настоящее время в мире и в России наиболее перспективными являются два вида солнечных энергетических установок:

- солнечные коллекторы;
- солнечные фотоэлектрические преобразователи.

### **5.4. Физические основы процессов преобразования солнечной энергии**

#### **5.4.1. Термоэлектрические преобразователи**

В основе прямого преобразования тепловой энергии солнечного излучения в электричество лежит эффект Зеебека, открытый в 1821 г. Если спаять концами два проводника разного химического состава

и поместить спаив в среды с разными температурами, то между ними возникает термо-ЭДС:

$$E = \alpha(T_1 - T_2),$$

где  $T_1$  – абсолютная температура горячего спаив;  $T_2$  – абсолютная температура холодного спаив;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

В цепи проводников возникает ток  $I$ , причем горячий спаив за секунду поглощает теплоту из нагретого источника в количестве  $Q_1 = \alpha T_1 I$ , а холодный спаив отдает теплоту низкотемпературному телу в количестве  $Q_2 = \alpha T_2 I$ . Разность подведенной и отведенной теплоты составляет секундную работу тока  $L$ , Вт:

$$L = \alpha(T_1 - T_2)I.$$

Отношение работы к подведенной теплоте есть термический КПД процесса преобразования:

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{\alpha(T_1 - T_2)I}{\alpha T_1 I} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

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

$$\eta = \eta_{\text{те}} \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

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

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

#### 5.4.2. Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрическая генерация энергии обусловлена пространственным разделением положительных и отрицательных носителей заряда при поглощении в полупроводнике электромагнитного излучения. В присутствии электрического поля эти заряды могут создавать во внешней цепи электрический ток. В местах переходов или неоднородностей материала существуют внутренние электростатические поля. Внутренние поля фотоэлементов на основе структур «полупроводник–

полупроводнику» или «металл–полупроводник» создают разность потенциалов около 0,5 В и плотность тока порядка 200 А/м<sup>2</sup> при плотности потока солнечного излучения около 1 кВт/м<sup>2</sup>.

Устройства на полупроводниковых переходах обычно называются фотоэлементами или солнечными элементами. Они сами являются источниками ЭДС. Фотоэлектрические устройства преобразуют лучистую энергию в электрическую. Солнечные элементы генерируют электрический ток в прямой зависимости от суточных, сезонных и случайных изменений облученности.

Эффективность использования солнечной энергии зависит не только от КПД фотоэлемента, но и от согласованности динамической нагрузки во внешней цепи.

Простейший солнечный элемент на основе монокристаллического кремния представляет собой следующую конструкцию: на малой глубине от поверхности кремниевой пластины *p*-типа сформирован *p-n*-переход с тонким металлическим контактом; на тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт.

Пусть *p-n*-переход расположен вблизи от освещаемой поверхности полупроводника. При использовании солнечного элемента в качестве источника электроэнергии к его выводам должно быть подсоединено сопротивление нагрузки  $R_n$ . Рассмотрим вначале два крайних случая:  $R_n = 0$  (режим короткого замыкания) и  $R_n = \infty$  (режим холостого хода). Зонные диаграммы для этих режимов изображены на рис. 5.1, а, б.

При разомкнутой внешней цепи *p-n*-перехода (рис. 5.1, б) фотоэлектроны, попадая в *n*-область, накапливаются в ней и заряжают *n*-область отрицательно. Оставшиеся в *p*-области избыточные дырки заряжают *p*-область положительно. Возникающая таким образом разность потенциалов является напряжением холостого хода  $U_{ох}$ . Полярность  $U_{ох}$  соответствует прямому смещению *p-n*-перехода.

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

$$I_{\phi} = q \frac{P_a}{h\nu},$$

где  $q$  – величина заряда электрона;  $P_a$  – 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.



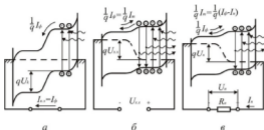


Рис. 5.1. Зонные энергетические диаграммы  $p$ - $n$ -перехода при освещении в разных режимах:

*a* – короткого замыкания; *б* – холостого хода;

*в* – включенная на сопротивлении нагрузки

При нулевых внутренних омических потерях в солнечном элементе режим короткого замыкания (рис. 5.1, *a*) эквивалентен нулевому напряжению смещения  $p$ - $n$ -перехода, поэтому ток короткого замыкания  $I_{sc}$  равен фототоку:

$$I_{sc} = I_0.$$

В режиме холостого хода (рис. 5.1, *б*) фототок уравновешивается «темновым» током  $I_s$  – прямым током через  $p$ - $n$ -переход, возникающим при напряжении смещения  $U_{sc}$ . Абсолютное значение «темнового» тока:

$$I_s = I_0 \exp\left[\left(\frac{qU_{sc}}{AkT}\right) - 1\right] = I_0,$$

откуда при  $I_0 \gg I_s \frac{1}{2}$ :

$$U_{sc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_0}{I_0} + 1\right) \approx \frac{AkT}{q} \ln \frac{I_0}{I_0},$$

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

$$A = 0,434 \frac{q}{kT} \Delta U,$$

где  $\Delta U$  – приращение напряжения при приращении плотности тока (или абсолютного значения тока) по касательной на один порядок.

«Темновой» ток сопровождается рекомбинацией неосновных носителей тока (в данном случае – электронов в  $p$ -области). При актах рекомбинации потенциальная энергия электронно-дырочных пар выделяется либо посредством излучения фотонов  $h\nu = E_g$ , либо расходуется на нагревание кристаллической решетки. Оба процесса схематически показаны дополнительными стрелками на рис. 5.1, б. Таким образом, режим холостого хода солнечного элемента эквивалентен режиму работы светодиодов, а также выпрямительных диодов в пропускном направлении.

Найдем обобщенное выражение для вольт-амперной характеристики освещенного  $p$ - $n$ -перехода. Для этого предположим, что к нему подключен источник питания с варьируемым напряжением. При положительном напряжении смещения фототок  $I_{\phi}$  вычитается из «темнового» тока  $p$ - $n$ -перехода, а при отрицательном – суммируется с ним. Выражение для вольт-амперной характеристики записывается в виде

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right] - I_{\phi}.$$

Рассмотрим подключение к  $p$ - $n$ -переходу варьируемого сопротивления нагрузки (рис. 5.1, в). Направление тока в нагрузке всегда совпадает с направлением  $I_0$ , а сам ток нагрузки  $I_n$  равен результирующему току через  $p$ - $n$ -переход. Принимая направление тока  $I_0$  за положительное, для  $I_n$  можно записать:

$$I_n = I_0 - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU_n}{AkT}\right) - 1 \right],$$

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

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

При известных параметрах нагрузочной вольт-амперной характеристики и заданном значении  $R_n$  величины  $I_n$  и  $U_n$  находятся методом последовательных приближений.

Таким образом, освещенный  $p$ - $n$ -переход может быть представлен в виде эквивалентной схемы, где источник тока имитирует генерацию постоянного фототока, не зависящего от напряжения  $p$ - $n$ -перехода, а диод представляет собой неосвещенный  $p$ - $n$ -переход. При варьировании  $R_n$  фототок перераспределяется между нагрузкой и  $p$ - $n$ -переходом.

Электрическая мощность, выделяемая в нагрузку, определяется по формуле

$$P = I_n U_n = I_q U_n - I_q U_n \exp\left(\frac{qU_n}{AkT}\right).$$

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

Таким образом, солнечный элемент состоит из двух соединенных между собой кремниевых пластинок. Свет, падающий на верхнюю пластинку, выбивает из нее электроны, посылая их на нижнюю пластинку. Так создается ЭДС элемента. Последовательно соединенные элементы являются источником постоянного тока. Несколько объединенных фотоэлектрических преобразователей представляют собой солнечную батарею.

Существует много вариантов и промышленных разработок фотоэлементов и методов их изготовления. Однако все они должны удовлетворять следующим техническим требованиям:

1. Химически высокочистый исходный материал с устойчивыми свойствами.

2. Минимальная стоимость фотоэлементов при производстве их в большом количестве. Необходимо обеспечить общий контроль за процессом их изготовления и высокий уровень точности.

3. Срок службы солнечных элементов не менее 20 лет в условиях воздействия окружающей среды. Рабочая температура фотоэлемента может меняться в диапазоне от  $-30$  до  $+200$  °С. Стабильные и защищенные от всех видов коррозии электрические контакты. Устройство должно быть водозащищенным.

4. Конструкция должна быть такова, что разрушение одного из элементов не должно приводить к выходу из строя всей системы. Для этого используются параллельные и последовательные соединения, которые в случае выхода из строя каких-либо элементов исключают возможность выхода из строя других элементов.

5. Сборные модули, пригодные для транспортировки даже в труднодоступные и отдаленные районы.

### 5.4.3. Нагревание воды солнечным излучением

Наиболее подходящая область использования солнечной энергии – подогрев воздуха и воды. В районах с холодным климатом необходимы отопление жилых зданий и горячее водоснабжение. В промышленности также требуется большое количество горячей воды. В Австралии, например, на подогрев жидкостей до температур ниже  $100$  °С расходуется почти 20 % потребляемой энергии. В связи с этим в некоторых

странах, особенно в Австралии, Израиле, США, Японии, активно расширяется производство солнечных нагревательных систем.

Энергия Солнца используется в нагревателях воды, воздуха, солнечных дистилляторах, зерносушилках, солнечных банях (солнечных энергетических установках башенного типа).

Основным элементом солнечной нагревательной системы является приемник (рис. 5.2), в котором происходит поглощение солнечного излучения и передача энергии жидкости.

Плоские приемники собирают как прямое, так и рассеянное излучение и поэтому могут работать также и в облачную погоду. В связи с этим, а также с учетом относительно невысокой стоимости плоские приемники являются предпочтительными при нагревании жидкостей до температур ниже 100 °С.



Рис. 5.2. Последовательность приемников солнечного излучения в порядке возрастания их эффективности и стоимости

Простые приемники содержат весь объем жидкости, которую необходимо нагреть. Приемники более сложной конструкции нагревают за определенное время только небольшое количество жидкости, которая затем, как правило, накапливается в отдельном резервуаре, что позволяет снижать тепловотери системы в целом.

Приемники солнечной энергии можно классифицировать следующим образом (рис. 5.2):

- открытый резервуар на поверхности земли. Тепло легко уходит в землю;
- открытый резервуар, изолированный от земли. Чистая вода не является хорошим поглотителем, потери тепла происходят вследствие испарения;
- черный резервуар. Используется в Японии для подогрева воды к вечерним ваннам; характеризуется большими потерями тепла, особенно в ветреную погоду, и невозможностью накопления нагретой воды на ночь;
- черный резервуар с изолированным от земли дном. Потери тепла происходят через верхнюю крышку, поэтому теплопотери всего в 2 раза ниже, чем в предыдущем случае;
- черный резервуар в контейнере со стеклянной крышкой. Использование полиэтиленовых крышек дешевле, но они быстро разрушаются на солнце;
- металлическая пластина с трубками и заполненная водой плоская емкость. Стандартный промышленный приемник; нагреваемая жидкость протекает сквозь приемник и накапливается в специальном резервуаре. Заполненная водой пластина более эффективна, чем пластина с трубками;
- пластинчатый приемник с двойным стеклянным покрытием. Жидкость может быть нагрета до 100 °С;
- селективная поверхность, радиационные потери ниже;
- вакуумированный приемник. Жидкость в черной внутренней трубке, стеклянная наружная трубка. Нет конвективных потерь через наружную поверхность.

На рис. 5.3 приведена схема водонагревательной установки.



Рис. 5.3. Солнечный водонагреватель

Водонагреватель данной конструкции предназначен для снабжения горячей водой в основном индивидуальных хозяйств. Устройство состоит из короба со змеевиком, бака холодной воды, бака-аккумулятора и труб. Короб стационарно устанавливается под углом  $30...50^\circ$  с ориентацией на южную сторону. Холодная, более тяжелая, вода постоянно поступает в нижнюю часть короба, там она нагревается и, вытесненная холодной водой, поступает в бак-аккумулятор. Она может быть использована для отопления, душа либо других бытовых нужд.

Дневная производительность на широте  $50^\circ$  примерно равна  $2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  с квадратного метра. Температура воды в баке-аккумуляторе достигает  $60...70^\circ\text{C}$ . КПД установки –  $40\%$ .

#### **5.4.4. Другие применения солнечной энергии**

Солнечную энергию можно использовать не только для подогрева воды, но и для подогрева воздуха, просушивания зерна, обогрева зданий. Эти приложения имеют важное значение для экономики. Значительная часть урожая в мире теряется вследствие поражения плесневым грибом, которое можно предупредить правильным просушиванием. Частичная разгрузка энергетика, связанная с проектированием или перестройкой зданий для использования солнечного тепла, позволит сэкономить громадные средства, которые затрачиваются на топливо. Тепловые двигатели, эффективность которых возрастает с повышением рабочей температуры, очевидно, также могут использовать солнечное тепло. Высокие температуры можно получить при концентрации потока солнечного излучения на малой площади.

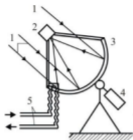
#### **5.5. Концентрирующие гелиоприемники**

Конструкция концентрирующего гелиоприемника представлена на рис. 5.4.

Концентрирующие гелиоприемники представляют собой сферические или параболические зеркала, параболоцилиндры, 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

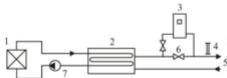
направления на Солнце, электронный блок преобразования сигналов, электродвигатель с редуктором для поворота конструкции гелиоприемника в двух плоскостях.



*Рис. 5.4. Конструкция концентрирующего гелиоприемника – параболического концентратора;*

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

На рис. 5.5 представлена принципиальная схема жидкостной комбинированной двухконтурной низкотемпературной системы солнечного отопления с параболическим концентратором и жидкостным теплоаккумулятором. В контуре гелиоприемника в качестве теплоносителя применен антифриз, а в контуре системы отопления – вода.



*Рис. 5.5. Жидкостная комбинированная двухконтурная низкотемпературная система солнечного отопления с параболическим концентратором и жидкостным теплоаккумулятором;*

- 1 – параболический концентратор; 2 – жидкостный теплоаккумулятор;*
- 3 – дополнительный теплоисточник; 4 – термометр; 5 – контур системы отопления;*
- 6 – регулирующий вентиль; 7 – циркуляционный насос*

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. В последнее время наиболее часто для солнечных низкотемпературных систем отопления применяют плоские гелиоприемники.

### 5.6. Солнечные коллекторы

Плоские солнечные коллекторы (рис. 6.6) 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).

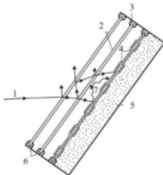
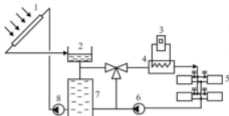


Рис. 5.6. Плоский солнечный коллектор:

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



На рис. 5.7 представлена принципиальная схема водяной низкотемпературной системы солнечного отопления с солнечными коллекторами, в которой предусмотрен автоматический дренаж коллекторов при прекращении воздействия солнечной радиации.



*Рис. 5.7. Схема водяной низкотемпературной системы солнечного отопления с плоскими коллекторами и их автоматическим дренажем при прекращении циркуляции:*

*1 – солнечные плоские коллекторы; 2 – расширительный бак;*

*3 – дополнительный теплоисточник; 4 – теплообменник;*

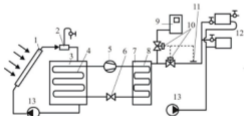
*5 – отопительные приборы; 6, 8 – циркуляционные насосы; 7 – бак-теплоаккумулятор*

В качестве тепловоспринимающей панели можно использовать любой металлический или пластмассовый лист с каналами для теплоносителя. Изготавливаются тепловоспринимающие 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. Под действием солнечной радиации тепловоспринимающие панели разогреваются до температур 70...80 °С, превышающих температуру окружающей среды, что ведет к возрастанию конвективной теплоотдачи панели в окружающую среду и ее собственного излучения на небосвод. Для достижения более высоких температур теплоносителя поверхность пластины покрывают спектрально-селективными слоями, активно поглощающими коротковолновое излучение солнца и снижающими ее собственное тепловое излучение в длинноволновой части спектра. Такие конструкции на основе «черного никеля», «черного хрома», окиси меди на алюминии, окиси меди на меди и другие – дорогостоящие (их стоимость часто сопоставима со стоимостью самой тепловоспринимающей панели).

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 (рис. 5.8), что снижает экономический эффект от их применения.



*Рис. 5.8. Жидкостная двухконтурная комбинированная низкотемпературная система солнечного отопления с плоскими коллекторами,*

*тепловым насосом и двумя жидкостными теплоаккумуляторами:*

- 1 – солнечные коллекторы; 2 – воздушное устройство; 3 – низкотемпературный жидкостный теплоаккумулятор; 4 – испаритель теплового насоса; 5 – компрессор; 6 – дроссельный вентиль; 7 – высокотемпературный жидкостный теплоаккумулятор; 8 – конденсатор теплового насоса; 9 – двухконтурный теплоисточник; 10 – магнитный вентиль; 11 – датчик температуры; 12 – отопительные приборы; 13 – циркуляционный насос*

В связи с этим наиболее целесообразно их использование в районах со средней интенсивностью солнечной радиации (не ниже  $300 \text{ Вт/м}^2$ ).

### 5.7. Паротурбинные СЭС

В 70-е гг. XX в. Советским Союзом в Крыму и Соединенными Штатами в Калифорнии построены паротурбинные СЭС, устройство которых схематически показано на рис. 5.9.

На башне 2 установлен котел 3, на котором фокусируется солнечное излучение, собираемое с нескольких гектаров земной поверхности зеркалами-гелиостатами. Гелиостаты 1 отслеживают движение Солнца по небосводу. Зеркала каждого гелиостата площадью в несколько квадратных метров направляют солнечные лучи на стенки теплообменника котлоагрегата, в котором вырабатывается пар с температурой до  $510^\circ\text{C}$ . По трубопроводу 5 пар направляется в машинный зал, где электроэнергия производится в традиционном паротурбинном цикле. Установка имеет накопитель теплоты 4 – емкость объемом в несколько тыс.  $\text{м}^3$ , заполненную щебнем, который нагревается «острым» паром в часы максимума интенсивности солнечного излучения и отдает теплоту после захода Солнца.

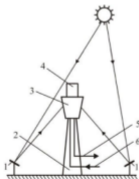


Рис. 5.9. Схема СЭС:

- 1 – гелиостаты; 2 – башня; 3 – солнечный котел; 4 – теплоаккумулятор;  
5 – трубопровод острого пара; 6 – трубопровод питательной воды

Вогнутые зеркала фокусируют солнечное излучение на трубы, в которых нагревается и испаряется питательная вода паротурбинной установки. Таким образом, этой СЭС башня с баком-парогенератором не нужна. Стоимость одного киловатта установленной мощности снижена по сравнению с «Солар-1» в 4 раза, себестоимость киловатт-часа произведенной энергии приблизилась к характерной для угольных станций.

Ряд паротурбинных СЭС различной мощности построен во Франции и в Италии. Разрабатываются проекты СЭС с замкнутыми газотурбинными установками, в которых рабочим телом является гелий. Параметры гелиевого теплоносителя перед турбиной: температура – около 600 °С, давление – 0,8 МПа; проектный КПД установок – около 25 %.

### Вопросы и задания к главе 5

1. Приведите классификацию солнечных энергетических установок.
2. Опишите принцип действия термоэлектрических преобразователей.
3. Перечислите достоинства и недостатки термоэлектрических преобразователей.
4. Приведите классификацию систем солнечного теплоснабжения и опишите их принцип действия.
5. Обоснуйте перспективы развития транспортных средств использующих солнечную энергию.
6. Опишите принцип действия фотоэлектрических преобразователей. В чем заключается их эффективность (достоинства и недостатки)?
7. Опишите принцип действия концентрирующих гелиоприемников. Каким образом их используют в схемах теплоснабжения?
8. Опишите схему, принцип действия, достоинства и недостатки паротурбинной СЭС.
9. Опишите принцип работы системы отопления с солнечными коллекторами.
10. Обоснуйте перспективы использования энергии Солнца.

## 6. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

### 6.1. Энергия ветра и возможности ее использования

#### 6.1.1. Происхождение ветра, ветровые зоны России

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание Солнцем земной поверхности. Земная поверхность неоднородна: суша, океаны, горы, леса обуславливают различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений. Все эти причины осложняют общую циркуляцию атмосферы. Возникает ряд отдельных циркуляций, в той или иной степени связанных друг с другом.

На экваторе у земной поверхности лежит зона затишья со слабыми переменными ветрами. На север и 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. 6.1.

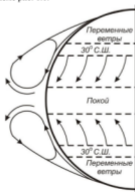


Рис. 6.1. Схема общей циркуляции земной атмосферы

*Пассаты* простираются примерно до 30° северной и южной широт и отличаются равномерностью воздушных течений по направлению и скорости. Средняя скорость юго-восточных пассатов северного полушария у поверхности земли достигает 6...8 м/с. Эти ветры вблизи больших континентов нарушаются сильными годовыми колебаниями температуры и давления над материками. Высота слоя пассатов простирается от 1 до 4 км. Выше над ними находится слой переменных ветров, а над этим слоем находится зона антипассатов, дующих в направлении, противоположном направлению пассатов. Высота слоя антипассатов меняется от 4 до 8 км в зависимости от времени года и от места.

В субтропических широтах в поясах высокого давления зоны пассатов сменяются штилевыми областями. К северу и югу от этих областей приблизительно до 70° 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. 6.1.

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

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

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

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

Прибрежные зоны северной части страны, Каспийское побережье и северная часть Сахалина, отличаются высокой интенсивностью ветрового режима. Здесь среднегодовые скорости ветра превышают 6 м/с. В этих районах часто наблюдаются ураганные ветры (выше 30 м/с), 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/с. В Арктике и на побережье наиболее эффективно применение ветроэлектрических станций, работающих совместно с тепловым резервом, а также небольших ветроэлектрических агрегатов.

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

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.

### **6.1.2. Перспективы использования энергии ветра**

Энергия движущихся воздушных масс огромна. Запасы энергии ветра более чем в сто раз превышают запасы гидроэнергии всех рек планеты. Климатические условия позволяют развивать ветроэнергетику на огромной территории от наших западных границ до берегов Енисея. Богаты энергией ветра северные районы страны вдоль побережья Северного Ледовитого океана. Почему же столь обильный, доступный и экологически чистый источник энергии так слабо используется? В наши дни двигатели, использующие ветер, покрывают всего одну тысячную мировых потребностей в энергии. Техника XX в. открыла совершенно новые возможности для ветроэнергетики, задача которой стала основной – получение электроэнергии. В начале века Н.Е. Жуковский разработал теорию ветродвигателя, на основе которой могли быть созданы высокопроизводительные установки, способные получать энергию от самого слабого ветерка. Появилось множество проектов ветроагрегатов, несравненно более совершенных, чем старые ветряные мельницы. В новых проектах используются достижения многих отраслей знания. В наши дни к созданию конструкций ветроколеса привлекаются специалисты-самолетостроители, умеющие выбрать наиболее целесообразный профиль лопасти, исследовать его в аэродинамической трубе. Усилиями ученых и инженеров созданы самые разнообразные конструкции современных ветровых установок.

Ветроэнергетика, использующая ветроколеса и ветрокарусели (двигатели карусельного типа, рис. 6.2), возрождается сейчас прежде всего в наземных установках. В США уже построены и эксплуатируются коммерческие установки. Проекты наполовину финансируются из государственного бюджета. Вторую половину инвестируют будущие потребители экологически чистой энергии.

Еще в 1714 г. француз Дю Квиг предложил использовать ветродвигатель в качестве двигателя для перемещения по воде. Пятилопастное ветроколесо, установленное на треноге, должно было приводить в движение гребные колеса. Идея так и осталась на бумаге, хотя понятно, что ветер произвольного направления может двигать судно в любом направлении.



Рис. 6.2. Ветродвижитель карусельного типа

Первые разработки теории ветродвигателя относятся к 1918 г. В. Залевский заинтересовался ветряками и авиацией одновременно. Он начал создавать полную теорию ветряной мельницы и вывел несколько теоретических положений, которым должна отвечать ветроустановка.

В начале XX в. интерес к воздушным винтам и ветроколесам не был обособлен от общих тенденций времени – использовать ветер, где это только возможно. Первоначально наибольшее распространение ветроустановки получили в сельском хозяйстве. Воздушный винт использовали для привода судовых механизмов. На всемирно известном «Фраме» (от фр. *fram* – вперед – исследовательское судно Ф. Нансена, исследователя Арктики) он вращал динамомашину. На парусниках ветряки приводили в движение насосы и жорные механизмы.

За прошедшие 25 лет интенсивного развития ветроэнергетики был достигнут огромный прогресс. Первые конструкции ВЭУ, освоённые в серийном производстве в США, Дании, Нидерландах, Германии и других странах, имели номинальную мощность от 30 до 100 кВт. Себестоимость вырабатываемой энергии на первом этапе эксплуатации ветровых ферм в штате Калифорния (США) была на уровне 30 цент/кВт·ч. В дальнейшем при повышении номинальной мощности ВЭУ до 500...700 кВт в одном агрегате и совершенствовании методов управления и организации эксплуатации ветровых ферм себестоимость вырабатываемой энергии снизилась до 5 цент/кВт·ч, что обеспечивает рентабельность ис-



пользования ВЭУ по сравнению с электростанциями, работающими на угле. В отдельных районах Дании и штата Калифорния доля энергии, выработанной на ветровых фермах, уже превысила уровень 10 % от общего количества вырабатываемой электроэнергии.

Недооценка роли ВИЭ в энергетике будущего приводит к отставанию России в развитии сетевой и автономной ветроэнергетики.

Опыт международного сотрудничества показал, что в российских условиях целесообразно ориентироваться прежде всего на продукцию отечественных предприятий, тем более что в последнее время появились признаки повышения активности разработчиков и производителей ВЭУ.

Перспективы дальнейшего развития российской ветроэнергетики в значительной мере зависят от государственной поддержки в виде утвержденной Программы развития ветроэнергетики, введения системы льгот производителям и потребителям, включая льготные кредиты на приобретение ВЭУ и предоставление участков для ведения строительства.

Основы энергетики на возобновляемых источниках показывают, что она налагает на производственные процессы совершенно другие ограничения, чем традиционная тепловая и ядерная энергетика. Наиболее наглядно это видно на примере ветроэнергетики. Использование рассеянной и очень непостоянной по своей природе энергии ветра основано на принципиально других подходах, чем использование энергии от стабильных и интенсивных источников. И главное здесь – необходимость варьировать потребление энергии в соответствии с ее производством. Для преодоления этого ограничения необходимы эффективные и дешевые способы аккумуляции энергии.

### 6.1.3. Запасы энергии ветра и возможности ее использования

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

Ветроэнергетика с ее современным техническим оснащением является вполне сложившимся направлением энергетики. Ветроэнергетические установки мощностью от нескольких киловатт до мегаватт производятся в США, Китае и других странах. Большая часть этих установок используется для производства электроэнергии как в единой энергосистеме, так и в автономных режимах.

При скорости ветра  $u_0$  и плотности воздуха  $\rho$  ветроколесо, ометаемое площадью  $A$ , развивает мощность:

$$P = C_r A \frac{\rho u_0^3}{2},$$

где  $C_p$  – параметр, характеризующий эффективность использования ветроколеса энергии ветрового потока и называемый коэффициентом мощности (коэффициент зависит от конструкции ветроколеса и скорости ветра).

Поскольку скорость ветра непостоянна, а мощность очень сильно зависит от скорости, то выбор оптимальной конструкции ветроколеса во многом определяется требованиями потребителя энергии.

Максимальная проектная мощность ветроэнергетической установки (ВЭУ) определяется для некоторой стандартной скорости ветра. Обычно эта скорость равна примерно 12 м/с, при этом снимаемая с 1 м<sup>2</sup> ометаемой площади мощность порядка 300 Вт при  $C_p$  от 0,35 до 0,45.

Одно из основных условий при проектировании ветровых установок – обеспечение их защиты от разрушения очень сильными порывами ветра. Ветровые нагрузки пропорциональны квадрату скорости ветра, а раз в 50 лет бывают ветры со скоростью, в 5...10 раз превышающей среднюю, поэтому установки приходится проектировать с большим запасом прочности. Кроме того, скорость ветра очень колеблется во времени, что может привести к усталостным разрушениям, а для лопастей к тому же существенны переменные гравитационные нагрузки.

## 6.2. Классификация ветроустановок по принципу работы

Принцип действия всех ветродвигателей один: под напором ветра вращается ветроколесо с лопастями, передавая крутящий момент через систему передач валу генератора, вырабатывающего электроэнергию, водяному насосу. Чем больше диаметр ветроколеса, тем больший воздушный поток оно захватывает и тем больше энергии вырабатывает агрегат.

Принципиальная простота дает здесь исключительный простор для конструкторского творчества, но только неопытному взгляду ветроагрегат представляется простой конструкцией.

Традиционная компоновка ветряков – с горизонтальной осью вращения (рис. 6.3) – неплохое решение для агрегатов малых размеров и мощностей. Когда же размах лопастей выросли, такая компоновка оказалась неэффективной, так как на разной высоте ветер дует в разные стороны. В этом случае не только не удастся оптимально ориентировать агрегат по ветру, но и возникает опасность разрушения лопастей.

Кроме того, концы лопастей крупной установки, двигаясь с большой скоростью, создают шум. Однако главное препятствие на пути использования энергии ветра все же экономическая – мощность агрегата остается небольшой и доля затрат на его эксплуатацию оказывается значительной. В итоге себестоимость энергии не позволяет ветрякам с горизонтальной осью оказывать реальную конкуренцию традиционным источникам энергии.



Рис. 6.3. Крыльчатый ветродвигатель

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

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

Быстроходностью называется отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра:

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

Крыльчатые ветродвигатели, согласно ГОСТ 2656–44, в зависимости от типа ветроколеса и быстроходности разделяются на три группы (рис. 6.4):

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

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

- карусельные, у которых нерабочие лопасти либо прикрываются ширмой, либо располагаются ребром против ветра (рис. 6.5, поз. 1);
- роторные ветродвигатели системы Савонюса.

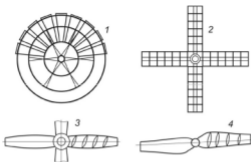


Рис. 6.4. Схемы ветроколес крылатых ветродвигателей:  
1 – многолопастных; 2–4 – малолопастных

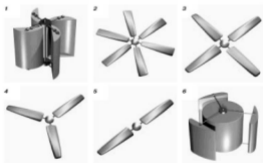


Рис. 6.5. Типы ветродвигателей:  
1 – карусельный; 2, 3 – многолопастные; 4, 5 – малолопастные; 6 – ортогональный

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

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

1. Поскольку рабочие лопасти колеса перемещаются в направлении воздушного потока, ветровая нагрузка действует не одновременно на все лопасти, а поочередно. В результате каждая лопасть испытывает прерывную нагрузку, коэффициент использования энергии ветра получается весьма низким и не превышает 10 %, что установлено экспериментальными исследованиями.

2. Движение поверхностей ветроколеса в направлении ветра не позволяет развить большие обороты, так как поверхности не могут двигаться быстрее ветра.

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

У роторных ветродвигателей системы Савониуса наибольший коэффициент использования энергии ветра 18 %.

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

Коммерческое применение крыльчатых ветродвигателей началось с 1980 г. За последние 14 лет мощность ветродвигателей увеличилась в 100 раз: от 20...60 кВт при диаметре ротора около 20 м в начале 1980-х гг. до 5000 кВт при диаметре ротора свыше 100 м к 2003 г. (рис. 6.6).

Некоторые прототипы ветродвигателей имеют еще большие мощность и диаметр ротора. За тот же период стоимость генерируемой ветряками энергии снизилась на 80 %. Зависимость стоимости электроэнергии от мощности ветродвигателей при их расположении на побережье и вдали от моря представлена на рис. 6.7 (в ценах 2001 г.).

Типы крыльчатых ветродвигателей отличаются только количеством лопастей.

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

Карусельные ветродвигатели обладают тем преимуществом, что могут работать при любом направлении ветра не изменяя своего положения.

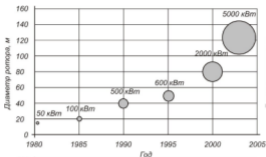


Рис. 6.6. Рост мощности и диаметра ротора коммерческих ветродвигателей

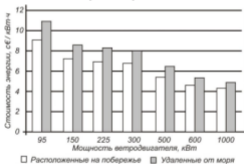


Рис. 6.7. Зависимость стоимости электроэнергии от мощности ветродвигателей при их расположении на побережье и вдали от моря

Коэффициент использования энергии ветра (рис. 6.8) у крыльчатых ветродвигателей намного выше, чем у карусельных. В то же время, у карусельных – намного больше момент вращения. Он максимален для карусельных лопастных агрегатов при нулевой относительной скорости ветра.

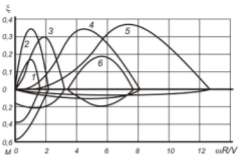


Рис. 6.8. Коэффициенты использования энергии ветра и вращающие моменты различных типов ветродвигателей

Распространение крыльчатых ветроагрегатов объясняется величиной скорости их вращения. Они могут непосредственно соединяться с генератором электрического тока без мультипликатора. Скорость вращения крыльчатых ветродвигателей обратно пропорциональна количеству крыльев, поэтому агрегаты с количеством лопастей больше трех практически не используются.

Различие в аэродинамике дает карусельным установкам преимущество в сравнении с традиционными ветряками. При увеличении скорости ветра они быстро наращивают силу тяги, после чего скорость вращения стабилизируется. Карусельные ветродвигатели (рис. 6.9) тихходны, и это позволяет использовать простые электрические схемы, например, с асинхронным генератором, без риска потерпеть аварию при случайном порыве ветра. Тихходность выдвигает одно ограничивающее требование – использование многополюсного генератора работающего на малых оборотах. Такие генераторы не имеют широкого распространения, а использование мультипликаторов (от лат. *multiplicator* – умножающий – повышающий редуктор) не эффективно из-за низкого КПД последних.

Еще более важным преимуществом карусельной конструкции стала ее способность без дополнительных ухищрений следить за тем «откуда дует ветер», что весьма существенно для приземных раскачивающихся потоков. Ветродвигатели подобного типа строятся в США, Японии, Англии, ФРГ, Канаде.



*Рис. 6.9. Однолопастной карусельный двигатель*

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

При взаимодействии потока с лопастью ветрогенератора возникают:

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

Препятствие для набегающего потока характеризуется параметром, называемым геометрическим заполнением и равным отношению площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку, к ометаемой им площади.

Основные классифицирующие признаки ветроэнергетических установок можно определить по следующим критериям:

1. Если ось вращения ветроколеса параллельна воздушному потоку, установка будет горизонтально-осевой, если ось вращения ветроколеса перпендикулярна воздушному потоку – вертикально-осевой.

2. Установки, использующие в качестве вращающей силы силу сопротивления (драг-машины), как правило, вращаются с линейной скоростью меньшей, чем скорость ветра, а установки, использующие подъемную силу (лифт-машины), имеют линейную скорость концов лопастей существенно большую, чем скорость ветра.



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

4. Установки для непосредственного выполнения механической работы часто называют ветряной мельницей, или турбиной, установки для производства электроэнергии, т. е. совокупность турбины и электрогенератора, называют ветроэлектрогенераторами, аэрогенераторами, а также установками с преобразованием энергии.

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

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

Выделяют следующие наиболее распространенные типы вертикально-осевых установок:

**1. Чашечный ротор (анемометр).** Ветроколесо этого типа вращается силой сопротивления. Форма чашеобразной лопасти обеспечивает практически линейную зависимость частоты вращения колеса от скорости ветра.

**2. Ротор Савоннуса.** Это колесо также вращается силой сопротивления. Его лопасти выполнены из тонких изогнутых листов прямоугольной формы, т. е. отличаются простотой и дешевизной. Вращающий момент создается благодаря различному сопротивлению, оказываемому воздушному потоку вогнутой и выгнутой относительно него лопастями ротора. Из-за большого геометрического заполнения

это ветроколесо обладает большим крутящим моментом и используется для перекачки воды.

**3. Ротор Дарье.** 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 используется в ветроэлектростанциях. Раскручиваться самостоятельно ротор, как правило, не может, поэтому для его запуска обычно используется генератор, работающий в режиме двигателя.

**4. Ротор Масгрива.** Лопасти этого ветроколеса в рабочем состоянии расположены вертикально, но имеют возможность вращаться или складываться вокруг горизонтальной оси при отключении. Существуют различные варианты роторов Масгрива, но все они отключаются при сильном ветре.

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

**Концентраторы.** Мощность ветроэнергостанции зависит от эффективности использования энергии воздушного потока. Одним из способов ее повышения является использование специальных концентраторов (усилителей) воздушного потока. Для горизонтально-осевых ветроэлектростанций разработаны различные варианты таких концентраторов. Это могут быть диффузоры или конфузоры (дефлекторы), направляющие на ветроколесо воздушный поток с площади, большей ометаемой площади ротора, и некоторые другие устройства. Широкого распространения в промышленных установках концентраторы пока не получили.

### **6.3. Производство электроэнергии с помощью ветроэнергетических установок**

#### **6.3.1. Характерные особенности ветрогенераторов**

Использование ветроустановок для производства электроэнергии является наиболее эффективным способом утилизации энергии ветра. Эффективность преобразования механической энергии в электрическую в электрогенераторе обычно составляет 95 %, а потери электрической энергии при передаче не превышают 10 %. Предъявляемые при этом требования к частоте и напряжению вырабатываемой электроэнергии зависят от особенностей потребителей этой энергии. Эти требования жесткие при работе ветроустановок в рамках единой энергосистемы и достаточно мягкие при использовании энергии ВЭУ в осветительных и нагревательных установках. В настоящее время разработано много проектов ветроэлектрических установок, включая и генераторы к ним.

При проектировании ветроэлектрических установок надо учитывать следующие их особенности:

1. Для обеспечения максимальной эффективности работы ветроколеса следует изменять частоту его вращения при изменении скорости ветра, сохраняя постоянным коэффициент быстроходности, в то же время для максимально эффективной работы электрогенератора необходима практически постоянная частота вращения.

2. Механические системы управления частотой вращения ветроколеса достаточно сложны и дороги. Гораздо эффективнее и дешевле управлять частотой его вращения, изменяя электрическую нагрузку электрогенератора.

3. Оптимальная частота вращения ветроколеса тем меньше, чем больше его радиус, поэтому только очень малые ветроколеса (радиусом не более 2 м) удастся соединять с генератором напрямую. При больших размерах ветроколеса приходится использовать повышающие редукторы, удорожающие ветроустановку и ее обслуживание. Альтернативой редукторам могут стать новые типы многополосных генераторов, работающих при меньших частотах вращения.

4. В конструкции ветроэлектрической установки предусматривается возможность отключения генератора от ветроколеса и вращения его от химического или механического аккумулятора энергии, поэтому систему управления генератором не связывают с работой ветроколеса. При отсутствии такой связи даже при «мягком» соединении генератора с ветроколесом необходимы специальные демпфирующие устройства, для того чтобы исключить механические удары, перегрузки и броски напряжений на выходе генератора.

Кроме того, следует учитывать специфические требования, предъявляемые к выходным параметрам ВЭУ, а именно:

- наиболее благоприятные ветровые условия существуют, как правило, в малонаселенных районах, на островах и в море. Требования к электроэнергии в таких районах весьма специфичны, но почти наверняка ее здесь требуется гораздо меньше, чем в развитых промышленных районах;

- анализ парка потребителей электроэнергии показывает, что лишь 5...10 % из них предъявляют определенные требования к ее параметрам. Это в основном электродвигатели, электронные устройства и осветительные установки. Поэтому целесообразно так строить систему электроснабжения, чтобы она могла обеспечивать потребителей как дешевой электроэнергией с нестабилизированными параметрами (например, для отопления), так и относительно дорогой, но со стабильными параметрами;

- энергосистемы в сельской местности обычно маломощные и относительно низковольтные; при передаче энергии на большие расстояния возникает много проблем, связанных с ее потерями, поэтому подключение ВЭУ к таким системам нецелесообразно;

- поскольку периоды безветрия неизбежны, то для исключения перебоев в электроснабжении ВЭУ должны иметь аккумуляторы энергии или быть запараллеленными электроэнергетическими установками других типов.

### 6.3.2. Классификация ветроэнергетических установок для производства электроэнергии

Различают три класса ветроэлектрических установок (табл. 6.1) в зависимости от относительной мощности ветроэлектростанции в полной мощности энергосистемы, к которой они подключены ( $P$  – мощность ВЭУ,  $P_G$  – мощность других генераторов систем).

Таблица 6.1

*Классы ветроэнергетических систем*

Класс	Степень автономности ВЭУ	Способы управления
A	Автономная	а) шагом ветроколеса; б) нагрузкой
B	Ветродизельная	а) раздельная работа ВЭУ и дизель-генератора; б) совместная работа ВЭУ и дизель-генератора
C	Подключенная к мощной энергосистеме	а) параметрами генератора постоянного тока; б) преобразованием постоянного тока в переменный; в) изменением коэффициента скольжения

**Класс А:** мощность ветроэлектростанции в энергосистеме является определяющей.

В основном к этому классу относятся отдельно стоящие одностанционные ветроустановки, не подключенные к какой-либо энергосистеме. Они могут не иметь никаких других источников энергии или иметь, например, дополнительный аэрогенератор меньшего размера. Мощность таких ветроустановок, предназначенных для использования в отдаленных районах в целях освещения, электропитания маяков, средств связи и т. п., не превышает 5 кВт. Если энергия таких ВЭУ используется более широко, например и для отопления, то их мощность может достигать 20 кВт.

**Класс В:** мощность ветроэлектрогенератора – одного порядка с мощностью других генераторов системы.

Такая ситуация характерна для небольших энергосистем в отдаленных районах. Чаще всего «другим генератором» является дизельный электрогенератор. В этом случае использование аэрогенератора позволяет экономить дизельное топливо. Дизельный генератор может включаться только в безветрие и работать параллельно с ветрогенератором при слабом ветре.

**Класс С:** ветроэлектрогенератор подключен к энергосистеме, значительно более мощной, чем его собственная мощность.

Это наиболее распространенный случай работы ветроэлектрогенератора любой мощности в районах, где имеются коммунальные или другие энергосистемы большой мощности. При этом энергия ВЭУ используется непосредственно, а ее излишки попадают в энергосистему. При слабом ветре и в безветрие потребители снабжаются электроэнергией от энергосистемы. Наиболее дешевым и безопасным типом ветроэлектрогенератора в этом случае является асинхронный генератор переменного тока, подключенный непосредственно в энергосистему. При этом частота вращения ветроколеса может не более чем на 10 % превышать частоту, соответствующую номинальной частоте электросети. При слабом ветре, чтобы исключить работу ВЭУ в режиме электродвигателя, его отключают от сети. Необходимость стабилизации частоты вращения ветроколеса при прямом включении аэрогенератора в сеть не позволяет поддерживать постоянной быстроходность ветроколеса, т. е. снижает его КПД.

#### **6.4. Минусы ветроэнергетики**

У ветроагрегаторов обнаружены недостатки. Например, распространение ветрогенераторов может затруднить прием телепередач и создавать мощные звуковые колебания. Появление экспериментального ветродвигателя на Оркнейских островах (Англия) в 1986 г. вызвало многочисленные жалобы от телезрителей ближайших населенных пунктов. В итоге около ветростанции был построен телевизионный ретранслятор. Лопасти крыльчатой ветряной турбины были выполнены из стеклопластика, который не отражает и не поглощает радиоволны. Помехи создавал стальной каркас лопастей и имеющиеся на них металлические полоски, предназначенные для отвода ударов молний. Они отражали и рассеивали ультракоротковолновый сигнал. Отраженный сигнал смешивался с прямым, идущим от передатчика, и создавал на экранах помехи. Построенная в 1980 г. в городке Бун (США) ветроэлектростанция, дающая 2 тысячи киловатт, действовала безотказно,

но вызывала нарекания жителей городка. Во время работы ветряка в окнах дребезжали стекла и звенела посуда на полках. Было установлено, что шестидесятиметровый винт при определенной скорости вращения издавал инфразвук. Он не ощущается человеческим ухом, но вызывает низкочастотные колебания предметов и небезопасен для человека.

Ветер дует почти всегда неравномерно, значит, и генератор работает неравномерно, отдавая то большую, то меньшую мощность, ток вырабатывается с переменной частотой. В итоге любой ветроагрегат работает на максимальной мощности лишь малую часть времени, а в остальное время он либо работает на пониженной мощности, либо просто стоит.

Для выравнивания отдачи тока применяют аккумуляторы, но это дорого и малоэффективно.

Как следует из вышесказанного, мощность одной ветроустановки не превышает в исключительных случаях 4 МВт, а в серийных установках – 200...250 кВт. Но и при столь малых мощностях ветроагрегаты – довольно громоздкие сооружения. Даже сравнительно небольшой ветроагрегат «Сокол» мощностью 4 кВт состоит из мачты высотой 10 м (с трехэтажный дом) и имеет диаметр трехлопастного ротора 12 м (который принято называть «колесом», хотя это вовсе и не колесо). ВЭС на большие мощности имеют соответствующие размеры.

### **6.5. ВЭС с точки зрения экологии**

Совершенно ясно, что даже к одному работающему ветряку близко подходить не желательно, притом с любой стороны, так как при изменении направления ветра положение оси ротора тоже изменяется. Для размещения же сотен, тысяч и тем более миллионов ветряков потребовались бы обширные площади в сотни тысяч гектаров. Дело в том, что ветроагрегаты близко друг к другу ставить нельзя, так как они могут создавать взаимные помехи в работе, «отнимая ветер» один от другого. Минимальное расстояние между ветряками должно быть не менее их утроенной высоты. Площадь для ВЭС мощностью 4 млн кВт потребует огромных территорий.

При этом необходимо иметь в виду, что уже ничего другого на этой площади делать нельзя. Работающие ветродвигатели создают значительный шум, и что особенно плохо – генерируют неслышимые ухом, но вредно действующие на людей инфразвуковые колебания с частотами ниже 16 Гц. Кроме этого, ветряки распугивают птиц и зверей, нарушая их естественный образ жизни, а при большом их скоплении на одной площадке могут существенно исказить естественное движение воздушных потоков с непредсказуемыми последствиями. Неудивитель-

но, что во многих странах, в том числе в Ирландии, Англии и других, жители неоднократно выражали протесты против размещения ВЭС вблизи населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий, а в условиях густонаселенной Европы это означает – везде.

В 2016 г. Российская Федерация совместно с 118 странами мира, на которые приходится 75 % выбросов углекислого газа в атмосферу, одобрила Парижское соглашение – соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, регулирующее меры по снижению выбросов с 2020 г. (соглашение было подготовлено в ходе Конференции по климату в Париже (COP 21), принято консенсусом 12.12.2015). В соответствии с данным соглашением планируется удержать рост глобальной средней температуры «намного ниже» 2 °С и «приложить усилия» для ограничения роста температуры величиной 1,5 °С. В проекте регламентируются ключевые обязательства в отношении развертывания возобновляемых источников энергии: достижение нейтрального энергообеспечения (без парниковых газов) во всем мире к 2050 г., что возможно только с глобальным ростом возобновляемых источников энергии до 100 % мирового потребления энергии.

Формально в России соглашение одобрено Распоряжением Правительства от 14.04.2016 г. № 670-р, однако ратификация данного соглашения Думой не завершена. Достичь данных показателей Россия, как и большинство других стран, может при развитии возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Россия обладает наибольшим в мире ветроэнергетическим потенциалом. Экономический потенциал страны оценивается в значение более 100 ТВт·ч/год, и для его освоения требуются производственные мощности.

Установленная мощность ветроэнергетических установок в мире в начале 2017 г. составила около 478 ГВт. На сегодняшний день в отрасли создано более 1 млн рабочих мест, а ветроэнергетика по-прежнему показывает динамичный рост во все большем числе стран мира, в Латинской Америке и Африке. Кроме того, 2017 г. Указом Президента РФ объявлен «Годом экологии». Его проведение намечено в целях привлечения внимания общества к вопросам экологического развития России, сохранения биологического разнообразия и обеспечения экологической безопасности. Развитие экологической безопасности напрямую зависит от энергетического сектора, особенно в изолированных регионах России, на Крайнем Севере, где хрупкая экология Арктики разрушается не только климатическими изменениями, но и бочками из-под отработанного дизельного топлива. Таким образом, развитие ветроэнергетики в России должно стать необратимым процессом.

### Вопросы и задания к главе 6

1. Опишите природу возникновения ветров.
2. Перечислите основные характеристики ветров.
3. В чем заключается опыт зарубежных стран в использовании энергии ветра?
4. Каким образом государства поддерживают внедрение объектов ветроэнергетики?
5. Приведите динамику роста доли энергии, вырабатываемой ветроустановками в общем энергобалансе отдельных зарубежных стран.
6. Где в условиях России применяются ветроустановки?
7. Приведите классификацию ветроустановок по классам ветродвигателей, достоинства и недостатки классов.
8. Опишите схему ветроэлектрической установки, ее особенности и принцип работы.
9. Приведите классификацию ветроэнергетических установок для производства электроэнергии.
10. Как ветер используется для производства механической работы?
11. Перечислите основные положения теории идеального ветряка.
12. Перечислите основные положения теории реального ветряка.
13. Какие существуют режимы работы ветроустановок?
14. Перечислите перспективы использования энергии ветра.
15. В чем недостатки работы ветроустановок?



## 7. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

### 7.1. Тепловой режим земной коры

В ядре планеты максимальная температура достигает  $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Выход тепла через твердые породы суши и океанского дна происходит главным образом за счет теплопроводности (геотермальное тепло) и реже – в виде конвективных потоков расплавленной магмы или горячей воды. Средний поток геотермального тепла через земную поверхность составляет примерно  $0,06\text{ Вт/м}^2$  при температурном градиенте менее  $30\text{ }^{\circ}\text{C/км}$ . Этот непрерывный поток тепла обычно сравнивают с аналогичными величинами, связанными с другими возобновляемыми источниками и в среднем в сумме составляющими  $500\text{ Вт/м}^2$ . Однако имеются районы с повышенными градиентами температуры, где потоки составляют примерно  $10...20\text{ Вт/м}^2$ , что позволяет реализовать геотермальные станции тепловой мощностью  $100\text{ МВт/км}^2$  и продолжительностью срока эксплуатации не менее 20 лет.

Качество геотермальной энергии обычно невысокое, и лучше его использовать непосредственно для отопления зданий и других сооружений или же для предварительного подогрева рабочих тел обычных высокотемпературных установок. Подобные отопительные системы уже эксплуатируются во многих частях света. Если тепло из недр получают при температуре около  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то имеет смысл говорить о преобразовании его в электроэнергию.

Часть источников геотермальной энергии можно отнести непосредственно к возобновляемым источникам энергии, потому что их тепло так или иначе рассеивается в окружающей среде, подобно теплу горячих ключей и гейзеров. В других же источниках потоки тепла приходится увеличивать, искусственно пробуривая скважины в природные накопители горячих вод, создавая разрывы и активизируя охлаждение горячих горных пород, и поэтому они не могут оставаться возобновляемыми в течение длительного времени. Внутренняя структура планеты показана на рис. 7.1.

Теплопередача от полужидкой мантии поддерживает температурную разность между внешней и внутренней поверхностями сравнительно тонкой коры около  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  при среднем градиенте температур около  $30\text{ }^{\circ}\text{C/км}$ .

Твердые породы, слагающие кору, имеют среднюю плотность  $2700\text{ кг/м}^3$ , теплоемкость  $1000\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$  и теплопроводность  $2\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Поэтому средний геотермальный поток составляет примерно  $0,06\text{ Вт/м}^2$ ,

а примерно  $1020 \text{ Дж/км}^2$  в виде тепла аккумулировано в коре. Если за 30 лет преобразовать хотя бы 0,1 % этого тепла, то тепловая мощность, которую можно получить, составит  $100 \text{ МВт/км}^2$ . Эти оценки дают представление о ресурсах тепловой энергии и показывают, что геотермальный источник обладает огромным потенциалом.

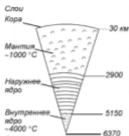


Рис. 7.1. Внутреннее строение Земли

Сведения о геотермальных структурах получают при геологической съемке, проходке шахт, нефтяных скважин. Наиболее важным параметром является температурный градиент, точность измерения которого зависит от сохранения в скважине в процессе бурения невозмущенного поля температур. При глубоком бурении скважин обычно достигают отметки 6 км, но технология бурения остается такой же до глубины 15 км. Технология обустройства таких скважин вполне отработана, так что применительно к строительству ГеоТЭС эта проблема может считаться решенной.

Принято выделять три класса геотермальных районов.

**Геотермальный.** Температурный градиент – более  $80 \text{ }^\circ\text{C/км}$ . Эти районы расположены в тектонической зоне вблизи границ континентальных плит. Первый такой район был задействован для производства электроэнергии в 1904 г. вблизи Лардерелло (Тоскана, Италия). Почти все из существующих ГеоТЭС размещены именно в таких районах.

**Полутермальный.** Температурный градиент – примерно от 40 до  $80 \text{ }^\circ\text{C/км}$ . Подобные районы связаны главным образом с аномалиями, лежащими в стороне от границ платформ. Извлечение тепла производится из естественных водоносных пластов или из раздробленных сухих пород. Хорошо известный пример такого района находится вблизи Пармича и используется для обогрева зданий.

**Нормальный.** Температурный градиент – менее 40 °С/км. Такие районы наиболее распространены, именно здесь тепловые потоки в среднем составляют примерно 0,06 Вт/м<sup>2</sup>. Маловероятно, чтобы в таких районах даже в будущем стало экономически выгодно извлекать тепло из недр.

## 7.2. Виды и свойства геотермальных источников энергии

В земной коре существует подвижный и чрезвычайно теплоемкий энергоноситель – вода, играющая важную роль в тепловом балансе верхних геосфер. Вода насыщает все породы осадочного чехла. Она содержится в породах гранитной и осадочной оболочек, а вероятно, и в верхних частях мантии. Вода в жидком состоянии существует только до глубины 10...15 км, ниже при температуре около 700 °С вода находится исключительно в газообразном состоянии. На глубине 50...60 км при давлениях около 3·10<sup>8</sup> атм исчезает граница фазовости, т. е. водяной газ приобретает такую же плотность, что и жидкая вода.

Температура подземных вод колеблется в широких пределах, обуславливая их состояние, влияя на состав и свойства. В соответствии с температурой теплоносителя все геотермальные источники подразделяют на эпитермальные, мезотермальные и гипотермальные.

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

К мезотермальным источникам относят источники с температурой воды 100...200 °С.

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

В геотермальной энергетике могут быть использованы практически все виды термальных вод: перегретые воды – при добыче электроэнергии, пресные термальные воды – в коммунальном теплообеспечении, соленоватые воды – в бальнеологических целях, рассолы – как промышленное сырье.

В случае естественных водоносных пластов, залегающих на значительной глубине, источник тепла лежит внутри слоя воды (рис. 7.2).

Часть пласта занята порами, заполненными водой ( $\rho'$ ), остальное пространство заполнено скальной породой с плотностью  $\rho$ . Предположим, что толщина водоносного слоя  $h$  много меньше глубины его залегания  $z_2$  и что соответственно температура всей массы жидкости равна  $T_2$ . Минимальная полезная температура равна  $T_1$ .

К областям распространения месторождений термальных вод относятся: вулканическое кольцо бассейна Тихого океана, Альпийский склад-

чатый пояс, рифтовые долины континентов, срединно-океанические хребты, платформенные погружения и предгорные краевые прогибы (рис. 7.3). По своему происхождению месторождения термальных вод можно подразделить на два типа, различающиеся способом переноса тепловой энергии.

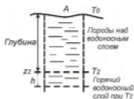


Рис. 7.2. Профиль горячего водоносного слоя для расчета запасов тепла

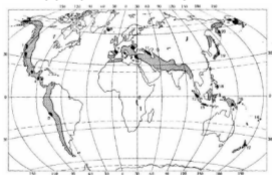


Рис. 7.3. Области производства геотермальной энергии в системе третичных орогенетических поясов (заштриховано):

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

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.

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.

### **7.3. Методы и способы использования геотермального тепла**

Геотермальную энергию получают от источников тепла с высокими температурами. Она обладает некоторыми особенностями. Одна из них заключается в том, что температура теплоносителя существенно ниже температуры при сжигании топлива. Несмотря на то, что суммарные запасы геотермальной энергии велики, ее термодинамическое качество низко.

С геотермальными источниками всегда связывают попытки выработки электроэнергии как наиболее ценного продукта, в то время как наилучший способ утилизации тепловой энергии – использование комбинированного режима (и выработка электроэнергии и обогрева). Электроэнергия может быть подана в энергосистему и через нее передана потребителям наряду с электроэнергией, вырабатываемой другими источниками. Однако использование геотермальной энергии в виде тепла не менее важно.

Выработка электроэнергии будет представлять интерес, если теплоноситель имеет температуру более 300 °С, и не будет, если последняя ниже 150 °С.

Тепло затруднительно передавать на расстояние более 30 км, поэтому необходимо его использовать вблизи места добычи. В зонах холодного климата обогрев жилищ и промышленных зданий создает ощутимую потребность в тепле, если плотность населения составляет более 300 человек на км<sup>2</sup>. Таким образом, тепловая станция мощностью 100 МВт может обслуживать жилой район площадью примерно 20 × 20 км. Подобная геотермальная система давно используется в Исландии и Новой Зеландии. Другие крупные потребители тепла – теплицы, фермы для разведения рыб, установки для сушки пищевых продуктов и реализации других технологий.

Масштаб использования геотермальной энергии определяют некоторые факторы. Доминантой стоимости оказываются капитальные за-

траты на сооружение скважин, стоимость которых экспоненциально увеличивается с ростом их глубины. Поскольку температура увеличивается с глубиной, а выработка энергии увеличивается с ростом температуры, в большинстве случаев ограничиваются оптимальной глубиной скважины примерно 5 км.

Общее количество тепла, извлекаемого из геотермальной скважины, можно увеличить за счет повторной закачки отработанной и частично охлажденной воды. Это удобный способ избавиться от сбросовых вод, которые могут быть сильно минерализованными и являются опасными загрязнителями среды.

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

Верхне-Мутновская ГеоТЭС мощностью 12 МВт ( $3 \times 4$  МВт) является опытно-промышленной очередью Мутновской ГеоТЭС проектной мощностью 200 МВт, создаваемой для электроснабжения Петропавловско-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.

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

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/с 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 кремниеслоты (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.

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 перестовую 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 для действующей Паужетской ГеоТЭС достаточен для энергоустановки мощностью 2 МВт, стоимость оборудования – 1000 долл/кВт. Температура сбросной воды снижается до 55 °С, тем самым значительно уменьшается тепловое загрязнение реки.

Схема опытно-промышленной станции, предложенная институтом Теплоэлектропроект, представлена на рис. 7.4.

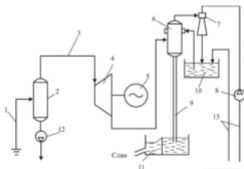


Рис. 7.4. Схема Паужетской опытно-промышленной геотермальной электростанции:

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

Пароводяная смесь из скважины поступает в сепаратор (емкостью  $10 \text{ м}^3$ , с нагрузкой парового объема  $600 \dots 800 \text{ м}^3/\text{час}$ ), 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  $100 \dots 110 \text{ }^\circ\text{C}$  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  $800 \dots 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

На ней установлены две турбины типа «МК-2,5» производства Калужского турбинного завода мощностью по 2,5 тыс. кВт каждая. Станция снабжает электроэнергией Озерновский поселок, рыбокомбинат и близлежащие населенные пункты.

### Вопросы и задания к главе 7

1. Перечислите виды геотермальных источников энергии.
2. Приведите классификацию геотермальных районов.
3. В чем перспективы использования геотермальной энергии? Ее достоинства и недостатки.
4. Какие существуют методы и способы использования геотермального тепла?
5. Как используется геотермальное тепло в системах теплоснабжения?
6. Опишите принципиальную схему геотермального теплоснабжения с теплообменниками.
7. Опишите принципиальную схему геотермального теплоснабжения с параллельной подачей геотермальной воды на отопление и горячее водоснабжение и пиковым подогревом воды на отопление.
8. Изобразите схему и опишите принцип действия простейшей ГеоТЭС.
9. Опишите схему геотермальной электростанции с низкоккипящим рабочим веществом.
10. Опишите принцип действия одноконтурной ГеоТЭС, ее схему, достоинства и недостатки.
11. Опишите принцип действия двухконтурной ГеоТЭС, ее схему, достоинства и недостатки.
12. В чем перспективы геотермальной энергетики в России?



## 8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВОДЫ

### 8.1. Энергия рек

Многие тысячелетия верно служит человеку энергия, заключенная в текущей воде. Запасы ее на Земле колоссальны. Недаром некоторые ученые считают, что нашу планету правильнее было бы называть не Земля, а Вода – ведь около трех четвертей поверхности планеты покрыты водой. Огромным аккумулятором энергии служит Мировой океан, поглощающий большую ее часть, поступающую от Солнца. Здесь плещут волны, происходят приливы и отливы, возникают могучие океанские течения. Рождаются могучие реки, несущие огромные массы воды в моря и океаны. Понятно, что человечество в поисках энергии не могло пройти мимо столь гигантских запасов Земли. Раньше всего люди научились использовать энергию рек.

Вода была первым источником энергии. И, вероятно, первой машиной, в которой человек использовал энергию воды, была примитивная водяная турбина. Свыше 2000 лет назад горцы на Ближнем Востоке уже пользовались водяным колесом в виде вала с лопатками. Суть устройства сводилась к следующему: поток воды, отведенный из ручья или речки, давит на лопатки, передавая им свою кинетическую энергию. Лопатки приходят в движение, а поскольку они жестко скреплены с валом, вал вращается. С ним, в свою очередь, скреплен мельничный жернов, который вместе с валом вращается по отношению к неподвижному нижнему жернову. Именно так работали первые «механизированные» мельницы для зерна. Но их соорудили только в горных районах, где есть речки и ручьи с большим перепадом и сильным напором. На медленно текущих потоках водяные колеса с горизонтально размещенными лопатками малоэффективны.

Шагом вперед было водяное колесо Витрувия (I в. н. э.). Это вертикальное колесо с большими лопатками и горизонтальным валом. Вал колеса связан деревянными зубчатыми колесами с вертикальным валом, на котором сидит мельничный жернов. Подобные мельницы и сегодня можно встретить на Малом Дунае; они перемалывают в час до 200 кг зерна.

Почти полторы тысячи лет после распада Римской империи водяные колеса служили основным источником энергии для всевозможных производственных процессов в Европе, заменяя физический труд человека.

Устройства, в которых энергия воды используется для совершения работы, принято называть водяными (или гидравлическими) двигателями.

Простейшие и самые древние из них – описанные выше водяные колеса. Различают колеса с верхним, средним и нижним подводом воды.

В современной гидроэлектростанции масса воды с большой скоростью устремляется на лопасти турбины. Вода из-за плотины течет через защитную сетку и регулируемый затвор по стальному трубопроводу к турбине, над которой установлен генератор. Механическая энергия воды посредством турбины передается генераторам и в них преобразуется в электрическую. После совершения работы вода стекает в реку через постепенно расширяющийся туннель, теряя при этом свою скорость.

Гидроэлектростанции классифицируются по мощности на мелкие (с установленной электрической мощностью до 0,2 МВт), малые (до 2 МВт), средние (до 20 МВт) и крупные (свыше 20 МВт). Вторым критерием, по которому разделяются гидроэлектростанции, – напор. Различают низконапорные ГЭС (напор до 10 м), среднего напора (до 100 м) и высоконапорные (свыше 100 м). В редких случаях плотины высоконапорных ГЭС достигают высоты 240 м. Такие плотины сосредоточивают перед турбинами водную энергию, накапливая воду и поднимая ее уровень.

Преимущества гидроэлектростанций очевидны: постоянно возобновляемый самой природой запас энергии, простота эксплуатации, отсутствие загрязнения окружающей среды. Да и опыт постройки и эксплуатации водяных колес мог бы оказать немалую помощь гидроэнергетикам. Однако постройка плотины крупной гидроэлектростанции оказалась задачей куда более сложной, чем постройка небольшой запруды для вращения мельничного колеса. Чтобы привести во вращение мощные гидротурбины, нужно накопить за плотинной огромный запас воды. Для постройки плотины требуется уложить такое количество материалов, что объем гигантских египетских пирамид по сравнению с ним покажется ничтожным.

## 8.2. Энергетические ресурсы океана

Известно, что запасы энергии в Мировом океане колоссальны, ведь две трети земной поверхности (361 млн км<sup>2</sup>) занимают моря и океаны – акватория Тихого океана составляет 180 млн км<sup>2</sup>. Атлантического – 93 млн км<sup>2</sup>, Индийского – 75 млн км<sup>2</sup>. Так, тепловая (внутренняя) энергия, соответствующая перегреву поверхностных вод океана по сравнению с донными, скажем, на 20 градусов, имеет величину порядка 10<sup>26</sup> Дж. Кинетическая энергия океанских течений оценивается величиной порядка 10<sup>15</sup> Дж. Однако пока люди умеют использовать лишь ничтожные доли этой энергии, да и то ценой больших и медленно окупающихся капиталовложений, так что такая энергетика до сих пор казалась малоперспективной.

Три насоса потребовались из следующего расчета: один – для подачи теплой воды из океана, второй – для подкачки холодной воды с глубины около 700 м, третий – для перекачки вторичной рабочей жидкости внутри самой системы, т. е. из конденсатора в испаритель. В качестве вторичной рабочей жидкости применяется аммиак.

Новые станции ОТЕС на мощность во много десятков и сотен мегаватт проектируются без судна. Это одна грандиозная труба, в верхней части которой находится круглый машинный зал, где размещены все необходимые устройства для преобразования энергии. Верхний конец трубопровода холодной воды расположится в океане на глубине 25...50 м. Машинный зал проектируется вокруг трубы на глубине около 100 м. Там будут установлены турбоагрегаты, работающие на парах аммиака, а также все остальное оборудование. Масса всего сооружения превышает 300 тыс. т.

#### *Энергия приливов и отливов*

В морских просторах приливы чередуются с отливами теоретически через 6 ч 12 мин 30 с. Если Луна, Солнце и Земля находятся на одной прямой (так называемая сизигия), Солнце своим притяжением усиливает воздействие Луны, и тогда наступает сильный прилив (сизигийный прилив, или большая вода). Когда же Солнце стоит под прямым углом к отрезку Земля–Луна (квадратура), наступает слабый прилив (квадратурный, или малая вода). Сильный и слабый приливы чередуются через семь дней.

Самые высокие и сильные приливные волны возникают в мелких и узких заливах или устьях рек, впадающих в моря и океаны. Приливная волна Индийского океана катится против течения Ганга на расстоянии 250 км от его устья. Приливная волна Атлантического океана распространяется на 900 км вверх по Амазонке. В закрытых морях, например Черном или Средиземном, возникают малые приливные волны высотой 50...70 см.

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

$$W = \rho g S R^2, \quad (8.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $S$  – площадь приливного бассейна;  $R$  – разность уровней при приливе.

Как видно из формулы, для использования приливной энергии наиболее подходящими можно считать такие места на морском побережье, где приливы имеют большую амплитуду, а контур и рельеф берега позволяют устроить большие замкнутые «бассейны».

Мощность электростанций в некоторых местах могла бы составить 2...20 МВт.

Первая морская приливная электростанция мощностью 635 кВт была построена в 1913 г. в бухте Ди около Ливерпуля. В 1935 г. приливную электростанцию начали строить в США. Американцы перегородили часть залива Пассамакводи на восточном побережье, истратили 7 млн долл., но работы пришлось прекратить из-за неудобного для строительства слишком глубокого и мягкого морского дна, а также из-за того, что построенная неподалеку крупная тепловая электростанция дала более дешевую энергию.

С 1967 г. в устье реки Ранс во Франции на приливах высотой до 13 м работает ПЭС мощностью 240 тыс. кВт с годовой отдачей 540 тыс. кВт·ч. Советский инженер Бернштейн разработал удобный способ постройки блоков ПЭС, буксируемых на плаву в нужные места, и рассчитал рентабельную процедуру включения ПЭС в энергосети в часы их максимальной нагрузки потребителями. Его идеи проверены на ПЭС, построенной в 1968 г. в Кислой Губе около Мурманска, своей очереди ждет ПЭС на 6 млн кВт в Мезенском заливе на Баренцевом море.

### **8.3. Энергетические установки по использованию энергии океана**

#### **8.3.1. Использование тепловой энергии океана**

Для преобразования энергии перепада температур в океане в настоящее время предложено несколько типов устройств. Наибольший объем исследований ведется по разработке систем, действующих по двухконтурной схеме с промежуточным рабочим телом на основе термодинамического цикла Ренкина, устройств, выполненных по одноконтурной схеме и работающих непосредственно на морской воде (открытый цикл Клода).

К основным на сегодняшний день (имеются в виду промышленно разрабатываемые установки) можно причислить и устройства, работающие по одноконтурной схеме, но нагруженные на обычную гидравлическую турбину (цикл Фетковича). Далее следует целый ряд модифицированных схем тепловых машин, использующих, кроме того, и другие перепады температур (воздух-вода, точнее атмосфера-гидросфера, гидросфера-литосфера), а также системы для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую.

Схема установки, работающей по замкнутому циклу, приведена на рис. 8.1.



делах от 15 до 26 °С 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. 8.2 это подчеркнуто с помощью разностей температур  $\Delta T_n = T_{g1} - T_1$  и  $\Delta T_k = T_2 - T_{g2}$ ). Конкретные температуры приведены на рис. 8.1. 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.

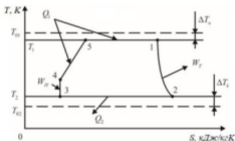


Рис. 8.2. Термодинамический цикл ОТЭС (цикл Ренкина)

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>. Соответственно, для станции с полезной мощностью 500 МВт водоизмещение будет составлять примерно 500 тыс. т (водоизмещение современного супертанкера). Трубопровод должен иметь диаметр не менее 30 м, площадь теплообменника будет около  $2 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>.

### 8.3.2. 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'Арсоналя по преобразованию тепловой энергии, запасенной в океане. В нашей стране с ее протяженным арктическим шельфом работы в этой области всегда вызвали интерес. Достаточно указать на проекты Г. Покровского (1901–1979), на работы, выполненные под руководством В.И. Марочка во Владивостоке, на проведенные там же исследования А.К. Ильина и В.В. Тихменова.

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

$$\eta_k = \frac{T_{\text{от}} - T_{\text{ст}}}{2T_{\text{от}}},$$

где  $T_{\text{ст}}$  – температура теплой подледной воды (275 К);  $T_{\text{от}}$  – 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:

$$P = \rho k c_p u A \eta \frac{(T_{\text{ст}} - T_{\text{от}})^2}{2T_{\text{ст}}}, \quad (8.2)$$

где  $k = \frac{H}{L}$  – 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 ( $\eta_k = 1$ ), то удельная мощность, получаемая с 1 м<sup>2</sup> площади океана при разности температур воды и воздуха, равной 10 °С, составляет примерно 18 кВт/м<sup>2</sup> при разности 20 °С – 60 кВт/м<sup>2</sup>, а при разности 30 °С – 125 кВт/м<sup>2</sup>. В этих оценках величина скорости движения воды принята равной 0,02 м/с – харак-

терная скорость для прибрежных районов Северного Ледовитого океана. Таким образом, при отсутствии ограничений по глубине океана в зоне размещения полярной ОТЭС и мощности в 1 МВт она будет возмущать тепловой режим на площади всего около 20 м<sup>2</sup>.

### 8.3.3. Прямое преобразование тепловой энергии

Схема ОТЭС на термоэлектрических преобразователях показана на рис. 8.3. 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.

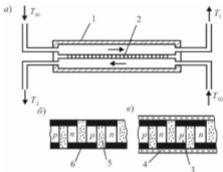


Рис. 8.3. Схема ОТЭС с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую:

*a* – 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 штыри

Величину этой разности потенциалов можно определить по известной формуле

$$E = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{H1}}{n_{H2}} \Delta T, \quad (8.3)$$



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 Клауда. 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 достоинство полупроводниковых систем – возможность обеспечения достаточно высокой теплоизоляции между нагревателем и холодильником, что сильно влияет на КПД систем.

К недостаткам таких систем относятся достаточно высокая стоимость материалов, из которых изготавливаются элементы, и необходимость изолировать спай 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 съём полезной мощности. Однако при этом необходимо иметь в виду, что в опытах японских исследователей в качестве носителя энергии использовалась не сама морская вода, а фторуглеродистые соединения. Правда, как отмечают сами исследователи, возможно применение и дистиллированной воды. Таким образом, увеличения съёма энергии достигают за счёт введения промежуточного подогрева и охлаждения вспомогательного теплоносителя, а это, в свою очередь, снижает эксплуатационные показатели преобразователя и увеличивает его материалоемкость. На выходные параметры термоэлектрических преобразователей, кроме разности температур, влияют условия теплообмена.

ОТЭС, созданные на описанном принципе, вероятно, можно применить для обеспечения электроэнергией комплексов подводной добычи полезных ископаемых на океанском дне.

### 8.3.4. Использование энергии приливов и морских течений

#### *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:

$$q = \rho \frac{V^3}{2}. \quad (8.4)$$

В случае приливного или речного течения при скорости, например, 3 м/с  $q = 1000 \cdot \frac{3^3}{2} = 13\,500$  Вт/м<sup>2</sup>. Только часть полной энергии потока может быть преобразована в полезную. Как и для ветра, это значение не может превышать 60 %. На практике оказывается, что это значение можно довести максимум до 40 %.

Скорости приливных течений изменяются во времени примерно как

$$V = V_0 \sin \frac{2\pi t}{\tau}, \quad (8.5)$$

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%-й эффективности преобразования энергии потока в электрическую), в среднем равна:

$$\bar{q} \approx 0,1\rho V^3. \quad (8.6)$$

При максимальной скорости около 5 м/с, встречающейся в проливах между островами,  $\bar{q} \approx 14$  кВт/м<sup>2</sup>. Перекрыв площадь 1000 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. 8.4. 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.

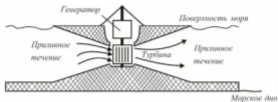


Рис. 8.4. Схема электростанции на приливном течении

Основы теории приливной энергетики достаточно просты. Предположим, что бассейн ПЭС наполняется при высокой воде и опустошается через турбины при малой воде (рис. 8.5).

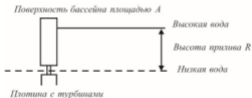


Рис. 8.5. Схема извлечения приливной энергии

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  $R/2$  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  $R/2$ . В этом случае энергия прилива

$$E = (\rho AR) \frac{gR}{2}. \quad (8.7)$$

Если энергия преобразуется в течение продолжительности периода прилива, то средняя потенциальная мощность за приливный период

$$E = \frac{\rho A R^2 g}{2\tau}. \quad (8.8)$$

На практике в системе, использующей сбрасывание запаса воды из заполняемого 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.

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.

#### *Использование энергии океанских течений*

Механическая мощность, которую можно извлечь из океанского течения, определяется тем же соотношением, которое используется для оценки этой величины в ветроэнергетике:

$$P = \eta A \rho \frac{V^3}{2}. \quad (8.9)$$

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 посадке. 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 конструкции силы Архимеда. Повышенная плотность воды позволяет, кроме того, уменьшить столь существенное для воздушных турбин воздействие вибраций, вызывающих усталостное разрушение материалов.

### Вопросы и задания к главе 8

1. Перечислите основные исторические этапы развития гидроэлектростанций.
2. Опишите принцип работы и схему гидроэлектростанции.
3. Приведите классификацию гидроузлов и основных типов зданий ГЭС.
4. В чем основные преимущества и недостатки гидроэлектростанций?
5. Опишите схему электростанции на приливном течении.
6. Охарактеризуйте современное состояние гидроэнергетики в России.
7. Опишите принцип использования тепловой энергии океана (схемы, эффективность, достоинства и недостатки).
8. Опишите принцип работы преобразователей энергии волн (схемы, эффективность, достоинства и недостатки).
9. Каким образом используют энергию приливов и морских течений (схемы, принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки)?
10. Какие перспективы использования энергии воды в России?
11. Перечислите основные сложности при сооружении установок для использования энергии воды.

## 9. ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ (ВЭР)

### 9.1. Понятие ВЭР. Источники ВЭР

В 70-е гг. XX в. в связи с резким повышением мировых цен на нефть, в экономике западных стран и Японии были развернуты активные работы по энергосбережению и использованию вторичных энерго-ресурсов. В Советском Союзе в это время, наоборот, развивалась добыча нефти и газа, в том числе на экспорт, проблемам сбережения энергии уделялось мало внимания. В итоге сформировалось отставание от мирового уровня по экономии топлива. Энергоемкость продукции народного хозяйства стала намного превышать мировой уровень.

В качестве основной энергетической характеристики производственного теплового процесса используют его КПД:

$$\eta = \frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{зат}}}, \quad (9.1)$$

где  $Q_{\text{исп}}$  – использованная;  $Q_{\text{зат}}$  – затраченная теплота на производство единицы продукции (например, в МДж/т).

### 9.2. Использование ВЭР для получения электрической и тепловой энергии. Способы использования и преобразования ВЭР

#### 9.2.1. Использование теплоты отработавших газов

##### *Теплосодержание отработавших газов*

Основной составляющей теплового баланса многих тепловых технологических процессов (главным образом огнетехнических) являются потери с отработавшими газами, %:

$$q_{\text{ог}} = \left( \frac{Q_{\text{ог}}}{Q_{\text{зат}}} \right) \cdot 100. \quad (9.2)$$

Величина  $q_{\text{ог}}$  меняется в пределах от 35...40 % при нагреве и термообработке металла до 65...70 % в высокотемпературных плавильных процессах.

Целесообразность и эффективность использования ВЭР определяется тепловой мощностью энергисточника, непрерывностью выдачи теплоты и температурным уровнем, т. е. отношением

$$(T - T_0) / T,$$

где  $T$  – абсолютная температура теплового отхода;  $T_0$  – абсолютная температура окружающей среды.

Чем ближе температурный уровень к единице, тем целесообразнее использование ВЭР. Увеличение тепловой мощности энергисточника приводит к снижению удельных капитальных вложений и эксплуатационных расходов. Непрерывность выдачи теплового отхода (непрерывность технологического процесса) определяет экономическую эффективность использования этого ВЭР. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяет теплота отработавших газов.

Текущее (на данный момент времени) теплосодержание отработавших в техпроцессе газов определяется выражением

$$H = V \cdot c_{\text{см}} \cdot t, \text{ кДж/с}, \quad (9.3)$$

где  $V$  – объемный расход газов, м<sup>3</sup>/с;  $c_{\text{см}}$  – средняя теплоемкость смеси газов, рассчитываемая по термодинамическим таблицам;  $t$  – их температура, °С.

При расчете теплосодержания газов следует учитывать присос воздуха в газоходы. При нарушении плотности газоходов возможно значительное увеличение коэффициента избытка воздуха, вследствие чего снижается температура и температурный уровень, т. е. ценность теплоты отработавших газов.

Начальная температура газов перед тепловоспользующей установкой зависит от места ее включения в газовый тракт, т. е. от общей технологической схемы производства. Начальная температура может существенно отклоняться от нормы, в частности вследствие неорганизованного догорания горючих компонентов в газоходах, из-за присосов воздуха. Появление присосов особенно нежелательно при общем снижении температуры отработавших газов по особенностям технологического процесса производства.

#### *Теплообменники для отработавших газов*

Допустимая предельная температура металлических рекуператорных теплообменников определяется жаростойкостью, а иногда и жаропрочностью применяемых марок стали. Жаростойкие металлы обладают стойкостью против появления окалины при температурах выше 500 °С, работая в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Жаропрочные металлы пригодны для работы при высокой температуре в нагруженном состоянии с сохранением достаточной окалиностойкости. Для повышения жаростойкости стали обычно применяют алитирование, т. е. покрытие поверхности тонким слоем расплавленного алюминия (методом погружения). Алитированная сталь при температурах 700...800 °С

имеет втрое большую жаростойкость, чем углеродистая. Жаростойкость стали повышают хромовым легированием. При содержании хрома 17 % допустимая температура металла составляет 800...850 °С.

Интенсивность теплоотдачи и потери давления в трубчатых теплообменниках зависят от скорости теплоносителя. В энергетике России оптимальными считаются скорости газа 5...8 м/с при продольном и 2...3 м/с при поперечном обтекании шахматных и коридорных трубных пучков. Получила распространение схема змеевикового конвективного трубчатого рекуператора, показанная на рис. 9.1. Эта схема отличается малой металлоемкостью, хорошей газоплотностью, беспрямственным температурным удлинением змеевиков.

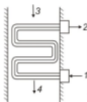


Рис. 9.1. Змеевиковый трубчатый теплообменник:

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

Энергетическое использование теплоты газов, отработавших в металлургических, химических и других технологиях, позволяет сэкономить многие миллионы тонн условного топлива в год. Эта теплота может использоваться для систем отопления. Однако для систем отопления характерен сезонный и крайне неравномерный график потребления. Длительность отопительного сезона для различных климатических зон России составляет от 2000 до 5000 часов в год, причем и в эти периоды отопительная нагрузка снижается от кратковременного максимума, соответствующего температуре наиболее холодных зимних дней, в 4...5 раз к концу зимнего сезона. Нагрузка на горячее водоснабжение составляет обычно не более 30 % от отопительной. Металлургический завод средней мощности мог бы выдавать за счет своих ВЭР 550...600 МВт тепловой энергии. Для реального потребления такого количества теплоты даже в зимнее время были бы нужны громадные жилые массивы, что в непосредственной близости от такого завода невозможно. Поэтому использование ВЭР для отопления и производства пара низких параметров, как правило, целесообразно только для установок малой тепловой мощности.



### Котлы-утилизаторы (КУ)

Для установок большой мощности оптимальной является утилизация теплоты отходящих газов в производстве электроэнергии. Рассматривались варианты применения для этих целей воздушных турбинных установок, в которых сжатый компрессором воздух нагревался бы в теплообменнике отходящими газами. Однако такие установки имели бы очень низкий КПД – на уровне 20...25 %. Эффективнее оказались паротурбинные установки. Принципиальная схема паротурбинной установки на теплоте отходящих газов представлена на рис. 9.2.

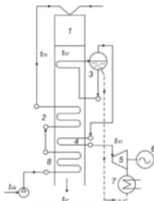


Рис. 9.2. Схема ПТУ на теплоте отходящих газов:

1 – рабочая камера; 2 – горячая ступень рекуператора; 3 – котел-утилизатор;

4 – пароперегреватель; 5 – турбина; 6 – генератор;

7 – конденсатор; 8 – холодная ступень рекуператора

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

При высоких температурах отходящих газов (более 900 °С) КУ оборадуются радиационными (жарными) поверхностями нагрева и имеют такую же компоновку, как и обычные паровые котлы, но без воздухоподогревателя. По аналогии с обычными котлами радиационная камера КУ называется топкой; в ней происходит первое радиационное охлаждение отходящих газов. Первичное охлаждение газов в топке необходимо для затвердевания уносимых из технологической установки, выдающей отходящие газы, расплавленных частиц шлака или других продуктов, чтобы они не прилипали к холодным змеевикам. В топке могут дожигаться горючие компоненты газов. КУ имеют все детали обычных котлоагрегатов: экраны, барабаны, пароперегреватели, водяные экономайзеры.

При проектировании КУ на данный вид вторичного энергоносителя приходится учитывать содержащиеся в отходящих газах агрессивные компоненты. При температуре отходящих газов ниже 900 °С используются только конвективные змеевики-теплообменники.

Наибольшее распространение среди низкотемпературных КУ получили котлы с многократной принудительной циркуляцией (МПЦ). Такие котлы при малых и меняющихся нагрузках имеют решающее преимущество перед обычными для топочных котлов конструкциями с естественной циркуляцией теплоносителя. Схема КУ с МПЦ представлена на рис. 9.3.

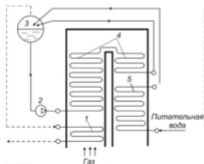


Рис. 9.3. Схема котла-утилизатора с многократной принудительной циркуляцией:  
1 – пароперегреватель; 2 – циркуляционный насос; 3 – барабан;  
4 – испарительные змеевики; 5 – экономайзер

Питательная вода, подогретая в экономайзере 5, подается в барабан 3. Циркуляционный насос 2 прокачивает воду через испарительные змеевики 4. Пароводяная смесь возвращается в барабан. Отсепарированный пар поступает в пароперегреватель 1, установленный в горячей входной части газового тракта, и затем направляется в турбину. Испарительные змеевики разбивают на несколько параллельно включенных секций, чтобы уменьшить их гидравлическое сопротивление. Кратность циркуляции в таких котлах составляет 2,5...4. Каждый котел снабжается двумя циркуляционными насосами (рабочим и резервным), которые питаются от отдельных трансформаторных подстанций.

Котлы-утилизаторы разной мощности на различные параметры отходящих газов выпускает Белгородский котельный завод. Паропроизводительность  $D$  этих КУ лежит в пределах от 7 до 40 т пара в час, давление рабочего пара – 1,3...4,5 МПа, температура – 250...440 °С. Повышение параметров пара позволяет существенно увеличить экономию топлива в КУ. От обычных топочных котлов КУ отличаются большим пропуском топочных газов  $\Sigma V_T$ , м<sup>3</sup>/с, при данной паропроизводительности  $D$ , кг/с. Отношение  $\Sigma V_T/D$  зависит от начальной температуры греющих газов перед котлом. При  $t_{\text{ср}} = 550...650$  °С это отношение составляет 6...8 м<sup>3</sup>/кг; при 800...850 °С – 3...3,5 м<sup>3</sup>/кг; при 1100...1250 °С – 2...2,5 м<sup>3</sup>/кг. В обычных топочных котлах это отношение составляет 1,2...1,5 м<sup>3</sup>/кг. Параметр  $\Sigma V_T/D$  определяет конструкцию и массогабаритные характеристики котла-утилизатора.

### 9.2.2. Использование теплоты низкого потенциала

Еще М.В. Ломоносов говорит, что даже в холодной воде теплоты предостаточно. Любое тело, температура которого отличается от абсолютного нуля, обладает запасом тепловой энергии. Проблема состоит в том, что теплота низкого потенциала (т. е. при низкой температуре) непригодна для прямого использования. Согласно законам термодинамики, для повышения энергетического потенциала необходимо затратить энергию.

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

Тепловая схема теплового насоса представлена на рис. 9.4. В испарителе 1 жидкий фреон испаряется при температуре  $T_0$  за счет подвода теплоты  $q_{\text{вх}}$  из низкотемпературной окружающей среды.

В компрессоре 2 пар сжимается с повышением температуры до  $T_1$ , причем затрачивается механическая энергия  $l = q_{\text{отс}} - q_{\text{отд}}$ . Далее фреоновый пар поступает в конденсатор 3, в котором он, конденсируясь в жидкую фазу, отдает теплоту  $q_{\text{отд}}$  в отопительную систему. Образовавшийся конденсат дросселируется в дроссельном вентиле 4, и влажный пар фреона снова поступает в испаритель 1. В отличие от холодильной установки, где теплота, отнятая от охлаждаемого тела, сбрасывается в окружающую среду, в тепловом насосе окружающая среда является источником теплоты, которая передается на более высокий температурный уровень отопительной системы.

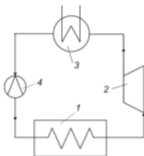


Рис. 9.4. Схема теплового насоса:

1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – дроссель

Совершенство теплонасосной установки определяется количеством теплоты, передаваемой в отопительную систему за счет единицы затрачиваемой механической энергии, и характеризуется величиной отопительного коэффициента  $\xi$ :

$$\xi = q_{\text{отд}} / (q_{\text{отс}} - q_{\text{отд}}). \quad (9.4)$$

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

3000 тепловых насосов с мощностью от 10 кВт. Тепловые насосы нескольких типоразмеров выпускает московский завод «Компрессор».

### 9.2.3. Системы аккумулирования энергии

При суточной и сезонной неравномерности выработки электроэнергии значительная экономия традиционных энергоносителей может быть достигнута путем аккумулирования энергии, производимой в периоды ее минимального потребления. Особенно важно иметь системы, запасующие энергию впрок, при эксплуатации установок с нерегулярной выработкой в течение суток или более длительных периодов – ветровых, приливных, солнечных. Проблема не решается с применением электроаккумуляторов: они очень дороги, громоздки и имеют малую емкость. Гидроаккумулирующие станции позволяют вернуть в энергосистему в часы пик до 70 % энергии, запасенной в часы минимума потребления. Однако строительство ГАЭС целесообразно в местностях с гористым рельефом, где рядом расположены удобные участки для верхнего и нижнего водоемов. Таких участков на равнинной европейской территории России мало.

Тепловая энергия может аккумулироваться веществами, которые при нагреве меняют свое агрегатное состояние, структуру или химический состав, потребляя или выделяя при этом теплоту. Например, кристаллический сульфат натрия, если к нему при температуре 32,3 °С подводится теплота, теряет воду, входящую в состав кристаллов:



Этот процесс дегидратации сопровождается поглощением большого количества теплоты, которое может снова выделиться при обратной реакции.

Частично проблема потребления избыточной электроэнергии решается с развитием энергоемких производств (например, электрометаллургических), работающих на полную мощность в часы провала нагрузки энергосистемы.

### 9.3. Отходы производства и сельскохозяйственные отходы.

#### Способы и возможности их использования в качестве первичных источников для получения электрической и тепловой энергии

##### *Использование теплоты продукции и отходов*

В различных отраслях промышленности имеются резервы ВЭР в виде теплоты высокотемпературных технологических продуктов и отходов (например, шлаков металлургии). Эта теплота частично используется для регенеративного нагрева дутьевого воздуха. Так, в мно-

гтоннажном производстве цементного клинкера, извести, керамзита и других строительных материалов во вращающихся обжиговых печах непрерывно выдается сыпучий горячий продукт с температурой 800...1100 °С. В последующем холодильнике, например в виде вращающегося барабана, нагревается движущийся противоточно дутьевой воздух (рис. 9.5).

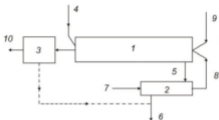


Рис. 9.5. Схема теплоиспользования при обжиге клинкера:

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

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

В черной металлургии широко применяются установки сухого тушения кокса инертными газами, т. е. азотом с примесями углекислоты. Азот получается как отход производства кислорода, необходимого доменным и сталелитейным цехам металлургического комбината. Температура выдаваемого кокса составляет 1100...1150 °С, пригодная к использованию теплота килограмма топлива равна примерно 1 МДж, что эквивалентно возможной экономии условного топлива около 35 кг на тонну кокса. Один коксохимический завод выдает в год 5...6 млн т продукции, соответственно при использовании этого ВЭР экономия условного топлива составит 200...240 тыс. т.

Установка состоит из тушильного бункера, змеевикового котла типа МПЦ, вырабатывающего до 20 т/ч пара давлением 4 МПа при 450 °С, и дымососа производительностью 60...70 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Раскаленный кокс подается с температурой около 1000 °С и охлаждается до 250 °С.

Инертные газы противоточно нагреваются в тушильном бункере до 800...850 °С, направляются в паровой котел и охлаждаются в нем до 170 °С. При этом пару передается до 65 % теплоты кокса. Котел КСТК Белгородского завода потребляет в час 100 000 м<sup>3</sup> горячих газов, производит 32 т пара с давлением 4,0 МПа, температурой 440 °С.

При сухом тушении кокса предотвращается выброс в атмосферу громадного количества водяного пара, который имеет место при мокром гашении. Кроме того, пар мокрого тушения содержит фенолы и вызывает коррозию металлоконструкций и загрязнение атмосферы. Поэтому на современных металлургических заводах повсеместно внедряется сухое тушение кокса.

Следует отметить и некоторые недостатки использования теплоты сухого тушения кокса. К ним относится усложнение и повышение стоимости оборудования. Трудно обеспечивать и сохранять в условиях эксплуатации инертность газов из-за присосов воздуха. Тушильные газы содержат значительное количество (до 15 г/м<sup>3</sup>) коксовой пыли, которая истирает трубные поверхности нагрева, ротор и кожух дымососа. Необходимо применять износостойчивые дымососы, работающие при меньших скоростях газового потока.

Черная и цветная металлургия поставляет огромное количество жидких шлаков с температурой 1200...1500 °С. Потери теплоты со шлаками составляют до 30 % теплового баланса предприятия. Отвальные шлаки доменного процесса выдаются периодически, с интервалом в несколько часов, что затрудняет их использование. Они имеют силикатный характер и состоят в основном из СаО, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Шлаки цветной металлургии выдаются равномерно и содержат оксиды железа. Плотность шлаков находится в пределах 3,2...4,2 кг/м<sup>3</sup>. Вязкость шлаков понижается с повышением их температуры. Температура плавления находится в растянутом интервале перехода от пластического к жидкому состоянию, с повышением содержания SiO<sub>2</sub> этот интервал достигает 300 °С. Теплосодержание шлаков различного состава при температуре 1250 °С находится в пределах 1600...2200 кДж/кг, т. е. экономия условного топлива при утилизации этого ВЭР может составить 55...75 кг на тонну шлака.

Отвальные шлаки используются для производства различных строительных материалов: гранулированного щебня, литой брусчатки, строительной пемзы, шлаковаты, цементного клинкера. Теплотехническое использование шлаков сначала развивалось в целях теплофикации в водогрейных установках. Гранулированный шлак отдавал теплоту воде первого контура, вода теплофикационной сети нагревалась в водоводяном поверхностном теплообменнике. Недостатками таких установок яв-

лялись интенсивная коррозия металла в контуре загрязненной воды, эрозия насосов и трубопроводов, загрязнение поверхности нагрева теплообменника мелкими частицами шлака.

При решении задачи комплексного энерготехнологического использования теплоты отвальных шлаков оптимальным является воздушное охлаждение гранулированного шлака. Горячий воздух может использоваться для нагрева дутьевого воздуха, необходимого для металлургической технологии, и для получения перегретого пара на ТЭС. На рис. 9.6 представлена схема энерготехнологической установки воздушного гранулирования шлака с выработкой пара энергетических параметров.

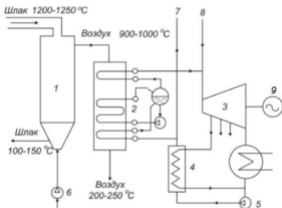


Рис. 9.6. Схема энерготехнологического использования шлака:

- 1 - воздушный шлакогранулятор; 2 - КУ типа МПЦ;
- 3 - паровая турбина; 4 - система регенеративного подогрева питательной воды;
- 5 - питательный насос; 6 - воздуходувка; 7 - вода на теплофикацию;
- 8 - пар от топочных котлов заводской ТЭЦ

Оценивая тепловой КПД шлакогранулятора в 70 %, паротурбинная установка будет вырабатывать около 100 кВт·ч на одну тонну шлака. ТЭС, использующая теплоту отвальных шлаков, может иметь мощность в десятки МВт.



### Вопросы и задания к главе 9

1. Что подразумевается под термином «вторичные энергоресурсы»?
2. Перечислите способы использования и преобразования ВЭР.
3. Какие существуют установки для использования теплоты отработавших газов?
4. Как используют теплоту испарительного охлаждения?
5. Как используют теплоту низкого потенциала?
6. Опишите принцип действия и опишите принципиальную схему теплового насоса.
7. Какие существуют перспективы развития водородной энергетики?
8. Перечислите установки для сжигания твердых отходов.
9. Какие существуют способы и возможности использования сельскохозяйственных отходов в качестве первичных источников энергии?
10. Обоснуйте перспективы использования ВЭР в России и зарубежом.

## 10. БИОТОПЛИВО

То, из чего состоят растения и животные, принято называть биомассой. Основа биомассы – органические соединения углерода, которые в процессе соединения с кислородом при сгорании или в результате естественного метаболизма выделяют тепло. Посредством химических или биохимических процессов биомасса может быть трансформирована в такие виды топлива, как газообразный метан, жидкий метанол, твердый древесный уголь. Первоначальная энергия системы «биомасса–кислород» возникает в процессе фотосинтеза под действием солнечного излучения, являющегося естественным вариантом преобразования солнечной энергии. При сгорании энергия биотоплива рассеивается, но продукты сгорания могут вновь преобразовываться в биотопливо путем естественных экологических или сельскохозяйственных процессов. Таким образом, использование промышленного биотоплива, будучи хорошо увязанным с природными экологическими циклами, может не давать загрязнений и обеспечивать непрерывный процесс получения энергии. Подобные системы называются агропромышленными. Для них наибольшие успехи достигнуты в отраслях, перерабатывающих сахарный тростник и древесину.

### 10.1. Классификация биотоплива

В качестве топлива биомасса характеризуется содержанием влаги и углерода. Влага присутствует в материале биомассы в виде внутриклеточной и межклеточной воды, поэтому сушка биомассы может оказаться обязательной. В момент сбора урожая влажность растительной биомассы составляет обычно 50 %, а у водорослей может достигать 90 % (имеются в виду водоросли, обитающие в водоемах, а не на суше). Материал считается «сухим», если находится в длительном равновесии со средой, обычно при этом он содержит от 10 до 15 % влаги.

Углеродные топлива могут классифицироваться по уровню восстановления энергии. В процессе превращения биомассы в  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  выделяющаяся полезная энергия составляет примерно 450 кДж на моль углерода (38 МДж на 12 кг углерода) при единичном уровне восстановления  $R=1$ . Это неточная цифра: идут и другие превращения энергии. Так, сахар ( $R=1$ ) имеет теплоту сгорания около 450 кДж на 12 г углерода, содержащегося в нем. Полностью преобразуемый материал, например метан  $\text{CH}_4$  ( $R=2$ ), имеет теплоту сгорания около 900 кДж на 12 г углерода (или на 16 г самого метана).

Возможны следующие способы использования биотоплива:

1. Прямое сжигание для непосредственного получения тепла. Предпочтительно введение сухого гомогенного топлива.

2. Пиролиз. Биомассу нагревают либо в отсутствие воздуха, либо за счет сгорания некоторой ее части при ограниченном доступе воздуха или кислорода. Состав получающихся при этом продуктов чрезвычайно разнообразен. Здесь и газы, и пары, и жидкости, и масла, и древесный уголь. Изменение состава продуктов пиролиза зависит от температурных условий, типа вводимого в процесс сырья, способов ведения процесса. В некоторых случаях присутствие влаги необходимо, более того сырье обязательно должно быть влажным. Если основным продуктом пиролиза является горючий газ, то процесс называют газификацией.

3. Прочие термохимические процессы. Возможны различные варианты предварительной подготовки сырья и проведения самих процессов. В промышленных масштабах они обычно ведутся при строгом контроле химического состава продуктов реакций. Особое значение имеют такие технологии, при которых целлюлоза и крахмалы превращаются в сахара для последующей ферментации.

4. Спиртовая ферментация. Этиловый спирт – летучее жидкое топливо, которое можно использовать вместо бензина. Он вырабатывается микроорганизмами в процессе ферментации. Обычно для ферментации в качестве сырья используют сахара.

5. Анаэробная переработка. В отсутствие кислорода некоторые микроорганизмы способны получать энергию, непосредственно перерабатывая углеродсодержащие составляющие при средних уровнях восстановления производя при этом  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (метан). Этот процесс также является ферментационным, но его принято называть сбраживанием по аналогии с процессами, идущими в пищеварительном тракте жвачных животных. Получаемая смесь  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и попутных газов называется биогазом.

6. Биофотоллиз. Фотоллиз – это разложение воды на водород и кислород под действием света. Если водород сгорает или взрывается в качестве топлива при смешении с воздухом, то происходит рекомбинация  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2$ . Некоторые биологические организмы продуцируют или могут при определенных условиях продуцировать водород путем биофотоллиза. Подобный результат можно получить химическим путем без участия живых организмов в лабораторных условиях. Промышленного внедрения соответствующие процессы еще не получили.

7. Экстракция топлив. В некоторых случаях жидкие или твердые разновидности топлива могут быть получены прямо от живых или только что срезанных растений. Сок живых растений собирают, надрезав

кожуру стеблей или стволов, из свежесрезанных растений его выдавливают под прессом. Хорошо известный подобный процесс – получение каучука. Родственное каучуконосам растение Герера (также из рода Эуфорбия) производит углеводороды с более низкой, чем у каучуконосов, молекулярной массой, которые могут использоваться в качестве заменителей бензина.

## 10.2. Производство биомассы для энергетических целей

Термин «энергетические фермы» используется в очень широком смысле, обозначая производство топлива (энергии) в качестве основного или дополнительного продукта сельскохозяйственного производства (поля), лесоводства (леса), аквакультуры (пресные и морские воды), а кроме того, те виды промышленной и бытовой деятельности, в результате которых образуются органические отходы. Основной целью переработки сырья могло бы быть исключительно производство энергии, но более выгодно найти наилучшее соотношение между получением из различных видов биомассы и энергии, и биотоплива.

Одна из наиболее существенных опасностей та, что производство энергии станет конкурировать с производством пищи. Например, зерновые фермы США дают около 10 % мирового производства хлеба, а экспорт более чем 1/3 этого количества позволяет частично покрыть дефицит целого ряда стран. Крупномасштабное увеличение объема производства биотоплива (например, этилового спирта) по этой причине может оказать существенное отрицательное влияние на мировой рынок пищевых продуктов. Вторая серьезная опасность – возможность обеднения и эрозии почв в результате интенсификации выращивания «энергетических» культур. Очевидная стратегия спасения от этих явлений – выращивание культур, пригодных и для обеспечения человека (зерно), и для энергетических нужд при одновременном сокращении части урожая, скармливаемого животным.

**Географическое распределение.** Наибольшим потенциалом для развития концепции энергетических ферм обладают тропические страны, особенно такие, где имеются соответствующие условия по качеству почв и количеству выпадающих осадков. Идеи этого направления для развивающихся стран кажутся очевидными.

**Энергетический анализ.** Для выращивания и переработки урожая необходима энергия в форме солнечного излучения и в форме, пригодной для получения топлива для работы сельхозмашины, создания этих самых машин, получения удобрения и т. п. Вторая форма в целом – не что иное, как энергия брутто – обобщение всех форм энергии, отличной

от солнечной и затрачиваемой на то, чтобы обеспечить весь цикл сельскохозяйственного производства.

### 10.3. Сжигание биотоплива для получения тепла

С помощью тепла сжигаемой биомассы готовят пищу, обогревают жилище, осуществляют целый ряд технологических процессов при переработке урожая. Его используют для получения электроэнергии, необходимой для работы различной техники. В большинстве развивающихся стран сжигание биомассы обеспечивает покрытие наибольшей доли потребности в топливе.

*Приготовление пищи и обогрев жилищ.* Почти половина населения планеты использует древесину и другие виды биотоплива для приготовления пищи и других домашних нужд. Средний уровень потребления топлива составляет примерно 0,5...1 кг сухой биомассы на человека в сутки (10...20 МДж/сут, что соответствует примерно 150 Вт). Если умножить это значение на  $2 \cdot 10^9$  человек, получим 300 ГВт. Непрерывное потребление 150 Вт только для приготовления пищи может показаться неоправданно большим. Это связано с использованием малоэффективных методов, в большинстве случаев основанных на применении открытого огня. Соответствующие «устройства» имеют КПД всего около 5 %. Остальное теряется вследствие неполного сгорания, за счет уноса части тепла дуновениями ветра, потерями на излучение и т. д., возникающими от несоответствия размеров очага и котла. Значительное количество энергии теряется, кроме того, в результате испарения из неприкрытого котла и из-за использования сырого топлива. Дым (недогоревший углерод и смолы) от огня – следствие неполного сгорания. Продукты полностью сгоревшей древесины (побочные продукты сгорают во вторичных реакциях) содержат только  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Следует отметить, что дым представляет опасность для здоровья, а скорость сгорания никак не регулируется.

*Сушка технических культур* (копра, какао, кофе, чай, фрукты) для обеспечения их сохранности обычно сопровождается сжиганием древесины или отходов от переработки самих культур либо использованием излишков тепла от производства электроэнергии. Чтобы высушить материал, его можно непосредственно поместить в поток газообразных продуктов сгорания, однако при этом существует опасность воспламенения и ухудшения пищевых качеств. Более приемлем способ, при котором сушку ведут воздухом, нагретым в теплообменниках.

*Сжигание отходов* – рациональный способ использования биотоплива, находящегося вблизи от места потребления энергии. Сжигание в эффективных печах позволяет получать потоки чистых горячих вы-

хлопных газов при температуре около 1000 °С, которые могут быть приведены к требуемой температуре за счет подмешивания холодного воздуха. Почти всегда выигрыш, получаемый от такой утилизации отходов биомассы, связан с тем, что их общее количество превышает необходимую потребность на сушку собственно конечных продуктов, обеспечивая получение избытка энергии для других целей, например промышленного получения пара.

**Производство тепла и электроэнергии.** Пар для обеспечения производства обычно получают, сжигая различные отходы биомассы в топках паровых котлов. При этом возможно использование метода сжигания в псевдоожиженном слое. Физически наиболее выгодно использовать для производства электроэнергии высокотемпературное тепло. Это приводит к тому, что получение электроэнергии сопровождается непрерывным сбросом низкотемпературного тепла. Отметим, кроме того, что паровые котлы в общем-то дороги, суммарная эффективность получения электроэнергии достаточно низка, т. к. в нее преобразуется только часть тепла. В некоторых случаях за счет получения электроэнергии и подачи ее в местные энергосети удастся оптимизировать производство тепла для нужд производства.

**Ресурс древесины.** Мы снова обращаем внимание на то, что древесину можно считать возобновляемым источником энергии только в том случае, если скорость ее прироста превышает скорость уничтожения. Возобновление может происходить в природном лесу или на искусственных плантациях (здесь рост обычно идет быстрее). Мировые источники древесины расходуются не только для сжигания, но и для выпуска строительных материалов, производства бумаги и других промышленных нужд. Вдобавок большое количество леса сжигается в процессе санитарных рубок.

Во многих странах (например, Судане, Кении, Непале) расходы древесины на топливо превышают ее прирост: запасы топлива истощаются. Более того, прирост населения стран, использующих древесное топливо, составляет 2...3 % в год. Вследствие этого растут потребности в топливе для приготовления пищи. Чтобы устранить эту проблему, необходимо одновременно с интенсификацией восстановления лесов переходить на более эффективные методы приготовления пищи.

#### 10.4. Спиртовая ферментация (брожение)

**Методы получения спирта.** Этиловый спирт (этанол)  $C_2H_5OH$  в естественных условиях образуется из сахаров соответствующими микроорганизмами в кислой среде, pH – от 4 до 5. Подобный процесс спиртовой ферментации во всем мире используют для получения питье-

вого спирта. Наиболее часто используемые микроорганизмы – дрожжи вида *Saccharomyces cerevisiae* – погибают при концентрации спирта выше 10 %, поэтому для повышения концентрации используют перегонку или фракционирование. После перегонки (дистилляции) получается кипящая при постоянной температуре смесь: 95 % этанола и 5 % воды. Обезвоженный этанол в промышленных условиях производится путем совместной перегонки с растворителем типа бензола. При брожении тервется лишь 0,5 % энергетического потенциала сахаров, остальные затраты энергии связаны с перегонкой. Необходимую тепловую энергию можно получить, сжигая остающиеся отходы биомассы.

**Использование этанола в качестве топлива.** Жидкие топлива чрезвычайно важны из-за удобства использования и хорошего управления сгоранием в двигателях. Можно вводить в несколько переделанные бензиновые двигатели прямо 95%-й этанол, а можно подавать в обычный двигатель смесь из 100%-го этанола (обезвоженный) с бензином в соотношении 1:10. Отметим, что вода не смешивается с бензином и часто обнаруживается в баках в виде отстоя, не причиняя особых неприятностей. Этого, однако, нельзя допустить в баках для смешения обезвоженного спирта с бензином.

Обезвоженный этанол – жидкость в интервале температур от  $-117$  до  $+78$  °C с температурой воспламенения 423 °C. Применение его в двигателе внутреннего сгорания требует специального карбюратора. Поэтому и смешивают бензин с обезвоженным этанолом (20 % по объему) и используют эту смесь (газохол) в обычных бензиновых двигателях. Газохол в настоящее время – обычное топливо в Бразилии (этанол там получают из сахарного тростника и маниока), используют его и в США (этанол из кукурузы). Важная особенность этанола – способность выдерживать ударные нагрузки без взрыва, из-за этого он гораздо предпочтительнее добавок из тетраэтилсвинца, вызывающего серьезные загрязнения атмосферы. Превосходные свойства этанола как горючего обеспечивают двигателям 20%-е 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.

### 10.5. Получение биогаза путем анаэробного сбраживания

В естественных условиях разрушение любых видов биомассы, в том числе навоза животных, происходит в почвенном гумусе путем разложения на элементарные соединения под действием разлагающих организмов, грибов, бактерий. Для этого процесса предпочтительны сырость,

тепло и отсутствие света. На конечной стадии процесса полное разложение происходит под действием множества бактерий, классифицируемых либо как аэробные, либо как анаэробные. Аэробные бактерии развиваются преимущественно в присутствии кислорода, с их участием углерод биомассы окисляется до  $\text{CO}_2$ . В замкнутых объемах с недостаточным поступлением кислорода из внешней среды развиваются анаэробные бактерии, также существующие за счет разложения углеводов. В конечном итоге за счет их деятельности углерод делится между полностью окисленным  $\text{CO}_2$  и полностью восстановленным  $\text{CH}_4$ . Питательные вещества, такие как растворимые соединения азота, сохраняются в качестве удобрений почвенного гумуса. Совершаемые микроорганизмами реакции разложения биомассы также относятся к процессам ферментации, однако для процессов, идущих в анаэробных условиях, чаще предпочитают термин «брожение» («сбраживание»).

Биогаз – смесь  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , образующаяся в специальных устройствах (биогазогенераторах), устроенных и управляемых таким образом, чтобы обеспечить максимальное выделение метана. Энергия, получаемая при сжигании биогаза, может достигать от 60 до 90 % исходной, которой обладает сухой исходный материал. Однако газ получают из жидкой массы, содержащей 95 % воды, так что на практике выход достаточно трудно определить. Другое и, по-видимому, очень важное достоинство процесса в том, что в его отходах содержится значительно меньше болезнетворных организмов, чем в исходном материале. Правда, отметим, что не все паразиты и патогенные микроорганизмы погибают в процессе анаэробного сбраживания.

### 10.6. Агрехимические способы получения топлива

Здесь речь пойдет о получении топлива в процессе жизнедеятельности растений, урожай которых можно использовать для производства масел и растворителей с минимальной переработкой. Случаи, когда растения полностью уничтожаются, не рассматриваются.

Можно разделить продукцию живых растений на следующие категории:

- семена – подсолнечник с массовым содержанием масла, равным 50 %;
- орехи – пальмовое масло, копра кокосов, массовое содержание масла в них составляет до 50 %;
- плоды – оливки;
- листья – эвкалипт, массовое содержание масел составляет 25 %;
- стволы, корни;
- сок растений – сок каучука;



- переработка отходов – масла и растворители до 15 % сухой массы, например скипидар, канифоль, маслянистые смолы из сосны, масло из листьев эуфорбии.

Лауреат Нобелевской премии Мелвин Кальвин считает агрохимические методы получения различных топлив предпочтительными. Возможность реализации ферм по производству агрохимических топлив обсуждается в связи с тем, что зачастую получаемые таким образом продукты по своим химическим свойствам гораздо ценнее, чем просто топливо. В то же время речь идет о создании ферм именно для производства моторного топлива.

### **Вопросы и задания к главе 10**

1. Дайте определение понятию «биотопливо».
2. Какие существуют виды биотоплива?
3. Опишите принцип работы котлов с кипящим слоем.
4. Что такое «энергетические фермы»?
5. Перечислите достоинства и недостатки развития энергетики за счет использования сельскохозяйственных культур в виде топлива.
6. Опишите процессы пиролиза и газификации.
7. Опишите целесообразность процесса сжигания древесных отходов.
8. Перечислите способы получения биогаза.
9. Перечислите агрохимические способы получения топлива.

## 11. МЕСТО ГАЗОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Технология газификации является универсальным методом для переработки углеродсодержащих материалов независимо от их структуры и свойств. В результате взаимодействия газифицирующего агента и газифицируемого материала получается синтез-газ различного состава. В зависимости от состава получаемого газа различают два основных направления его использования: сжигание в энергоустановках; применение в качестве исходного сырья для синтеза различных органических веществ.

Экспериментально-теоретические исследования процессов газификации и горения твердых топлив широко проводится в течение последних десятилетий в России, США, Германии, Италии, Франции, Китае, Индии и других странах. Приоритет по данной теме, признанный во всем мире, имеется у таких Российских научных школ, как Томский политехнический университет, Томский государственный университет, Кузбасский государственный технический университет, Институт угля СО РАН, Институт углекислого СО РАН, Институт химии нефти СО РАН и др. Это связано с промышленным освоением технологии газификации и наличия ведущих экспертов по данной теме в России.

Большинство современных газогенераторных технологий используют парокислородное и паровоздушное дутье. Применение таких газифицирующих агентов определяет как достоинства, так и недостатки этих методов. Наиболее существенными недостатками в данном случае являются: повышенное содержание балластных примесей в получаемом газе; часть углерода исходного материала неизбежно сгорает в газогенераторе.

Две трети территории России, на которой проживает более 30 млн человек, не имеет централизованного электро- и теплоснабжения. Указанная территория отличается отсутствием подвода к расположенным населенным пунктам газопроводов природного газа. Ежегодно по Программе Северного завоза в летне-осенний период завозится около 20 млн тонн жидкого топлива (дизельного зимнего и арктического топлива, топлива для газотурбинных установок, печное топливо, мазут и др.) для выработки электроэнергии и тепла. На данный момент стоимость вырабатываемой 1 Гкал тепла около 1500–2000 рублей, а себестоимость получаемой электроэнергии порой превышает 100–150 рублей за 1 кВт·ч. Указанные стоимости постоянно растут по разным

причинам. Учитывая, что предприятия по добыче угля (шахты, разрезы) находятся в удаленных районах ближе и более равномерно расположены на территории России, чем предприятия по добыче газа или переработки нефти, то возможность использования в качестве топлива угля вместо завозимого мазута и дизельного топлива в десятки раз может быть дешевле. Но для этого потребуются высокоэффективные газогенераторные установки для газификации угля и получения очищенного энергетического газа, который может быть применен в ПГУ-ТЭЦ, как топливо вместо природного газа, дизельного топлива и мазута. Это обеспечит ежегодную экономию десятков миллиардов бюджетных средств. В последующем получаемый из угля энергетический газ по качеству должен быть пригодным для выпуска на месте из него синтез-газа и моторных топлив, включая зимнее и арктическое дизельное топливо, реактивное топливо для авиации и ракетной техники.

В настоящее время энергетика РФ нуждается в обновленном оборудовании, созданном на уровне наилучших доступных технологий. Энергетическая стратегия России до 2030 г., утвержденная распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р, предусматривает рост использования угля в энергетике. Однако сегодня наблюдается ряд проблем развития традиционной (паросиловой) угольной энергетики в РФ. Одним из альтернативных направлений использования угля в энергетике, хорошо освоенным за рубежом, является применение газификации твердого топлива в парогазовых циклах ТЭС.

### **11.1. Опыт Российской Федерации в применении технологий газификации угля в промышленности и народном хозяйстве**

Основываясь на ряд мнений экспертов, можно сделать вывод, что в последующие годы уголь может стать передовой силой мировой экономики, при этом спрос на него значительно увеличивается. В отдельных случаях европейские эксперты предполагают, что мировой электроэнергетический рынок находится на грани возврата с газа на уголь, как наиболее предпочтительного топлива для электростанций.

Данная тенденция отражена в Энергетической стратегии России, где для создания энергетической безопасности страны сделан упор на необходимости гармонизации топливно-энергетического баланса страны путем активного развития угольной отрасли. С одной стороны, это обусловлено запасными ресурсами углей, объемы которых при существующем уровне потребления будут достаточны более чем на 450 лет, с другой стороны, удешевлением вследствие усложнения условий добычи нефти и газа, что приводит к ежегодному удорожанию данных энергетических ресурсов.

Анализируя современные тенденции, можно говорить о наступлении нового этапа в развитии угольной энергетики, который ряд специалистов называют «второй угольной волной».

Добываемый уголь в настоящее время сжигается в основном на тепловых электростанциях. В России на основе углей производится порядка 100 % металлургического кокса, вырабатывается более 20 % электрической энергии, обеспечивается 50 % спроса коммунально-бытового хозяйства и населения.

Колоссальными ресурсами и потенциалом располагает угольная отрасль РФ, однако около 80 % добываемых углей содержат большое количество золы, влаги и серы. На внутреннем и особенно на внешнем рынке низкокачественные угли существенно ограничивают сферу их применения. На данный момент времени обогащению подвергается не более 30 % энергетических углей, что нельзя сказать о мировой практике, в остальном мире проходит переработку почти весь добытый уголь. Компонентный состав энергетических углей позволяет использовать их как топливо и химическое сырье.

Экологический фактор является определяющим в развитии угольной промышленности. Эксплуатация угольнодобывающих и углеперерабатывающих предприятий сопровождается отрицательным воздействием на окружающую среду. Крупнейшую экологическую опасность на окружающую среду составляет воздействие отходов предприятий угольной промышленности. При увеличении развития отрасли количество отходов переработки углей будет возрастать, что может привести к острому кризису в экологической сфере.

Сдерживание в развитии отрасли осуществляется технический и технологический уровень угольного производства. Он значительно уступает мировому научно-техническому уровню за счет высокой энергоемкости и морально устаревших технологий. Сегодня до 75 % инвестиций в отрасли расходуется на технологии добычи углей.

Современный анализ мировых технологических трендов указывает на то, что угольные производства пребывают на грани перехода от индустриального к постиндустриальному развитию, результатом которого предусматривается применение технологий комплексного использования углей и их глубокой переработки.

По темпам внедрения таких технологий угольная отрасль России существенно отстает, выделение инвестиций на эти цели предусмотрено только на 3-м этапе (2021–2030) долгосрочной программы развития угольной промышленности России. В ней, в частности, планируются обеспечение «мировых стандартов» в сфере экологической безопасности при разработке и обогащении угля и промышленное получение продук-

тов глубокой переработки угля в синтетическое жидкое топливо, этанол и другие сопутствующие ресурсы, такие как метан, подземные воды, строительные материалы». По мнению множества специалистов энергетической отрасли, необходимо возобновить процесс освоения и внедрения технологий по глубокой переработке и комплексному использованию углей в России.

Масштабы по добыче угля в значительной мере опережают спрос традиционного угольного рынка, т. е. внутреннего рынка энергетического угля. Увеличения его емкости следует ожидать только в долгосрочной перспективе за счет введения новых угольных электростанций, а также при переходе крупных потребителей природного газа на уголь. В самой ближайшей перспективе производителям угля остается только жесткая конкуренция между собой, при этом главным инструментом конкурентной борьбы является снижение цен.

Экспорт угля не приносит ощутимой прибыли в связи с географической удаленностью большинства добывающих предприятий от потенциальных зарубежных потребителей. Существенная доля затрат приходится на транспортировку и доставку.

В итоге появилась острая необходимость в развитии переработки угля, которая обеспечит качественное улучшение свойств продукции для потребителей, что соответственно приведет к росту ее рыночной стоимости и обеспечит выход за пределы рынка энергетического угля.

Повышение качества и конкурентоспособности углей, расширение сфер их использования и снижение загрязнения окружающей среды отходами и вредными выбросами могут быть достигнуты на основе реализации трех видов технологий.

#### *Технологии глубокой переработки угля*

Первая группа (ее также называют «адаптивной») – технологии, обеспечивающие максимальное удовлетворение возрастающих требований традиционных потребителей (тепловые электростанции, металлургия, коммунально-бытовое хозяйство и т. д.) путем улучшения качественных параметров угольной продукции. Они позволяют повысить качество угольной продукции, сжигание которой сопровождается ростом КПД энергетических установок и экономией топлива.

В перечень таких технологий входят: обогащение углей, брикетирование, использование водоугольных суспензий, пылеугольное топливо.

Вторая группа (так называемые «диверсификационные» технологии) – технологии, обеспечивающие производство продукции с новыми потребительскими свойствами. К ним следует отнести: термическую

обработку (полукоксование), газификацию и гидрогенизацию углей. Эти технологии способствуют расширению существующих рынков угольной отрасли и формированию новых.

Третья группа (или «трансформирующие» технологии) – технологии, обеспечивающие переработку углей (и угольных отходов) в продукцию нетопливного назначения, пользующуюся определенным спросом со стороны разных отраслей промышленности.

В перечень таких видов продукции следует включить: адсорбенты, гуминовые удобрения, горный воск, углещелочные реагенты, микросферы и др. Использование технологий этой группы может способствовать улучшению экологической составляющей угольного производства за счет частичной утилизации отходов.

Основными недостатками известных технологий химической переработки углей по сравнению с технологиями нефтепереработки и нефтехимии являются относительно низкая производительность и жесткие условия их осуществления (высокие температура и давление). Для устранения указанных недостатков в углепереработке все шире применяются катализаторы и новые каталитические процессы, позволяющие получать из угля разнообразные продукты топливного и химического назначения.

Получаемые из угля синтетические топлива могут быть твердыми, жидкими и газообразными. К твердым синтетическим топливам относятся большое количество обгазированных или улучшенных топлив типа «чистый уголь», угольные брикеты, полукоксы, термоуголь, автоклавированный уголь. Синтетические жидкие топлива представлены котельным топливом (заменитель нефтяного мазута), моторными топливами и метанолам. Газообразные топлива, получаемые из угля, представляют собой топливный газ, «заменитель природного газа» и синтез-газ.

Получение из угля синтетических топлив осуществляется различными методами. Твердое топливо с повышенной экологической чистотой получается в результате удаления из исходного угля вредных примесей, таких как сера и минеральные примеси.

Преимуществами «чистого угля» являются снижение выбросов  $SO_2$  и твердых частиц при сжигании, а также повышение теплотворной способности по сравнению с исходным углем.

В результате происходит снижение выбросов твердых частиц при сжигании и может повышаться теплотворная способность топлива. В некоторых случаях в брикеты вводят специальные химические добавки, снижающие выход смол, сажи, серы и других вредных продуктов при сжигании.

Повышение качества бурых углей, имеющих низкую теплотворную способность из-за большого количества влаги и кислорода, до-

стигается путем их облагораживания при пиролизе или обработке перегретым паром.

Термическое облагораживание бурого угля повышает его тепловорную способность. Кроме того, снижается эмиссия  $SO_2$  и  $NO_x$  (для полукочка и термочугля) и могут уменьшаться выбросы твердых частиц при сжигании автоклавированного кускового угля.

Процесс газификации угля является многоцелевым относительно состава продуцируемого газа.

Состав и теплотворная способность продуцируемого газа зависят не только от режимов газификации, но и от конструкции используемого газогенератора. Применение топливного газа позволяет решать экологические и технологические проблемы в энергетике, металлургии и других отраслях промышленности. Особенностью получаемого заменителя природного газа является низкое содержание  $CO$  и, следовательно, относительно низкая токсичность, что позволяет широко применять этот газ в бытовых целях. Синтез-газ используется для химической переработки в метанол, моторные топлива или водород. Для получения жидких топлив непосредственно из угля используются процессы гидрогенизации, пиролиза, охижения растворителями.

При получении котельного топлива (заменителя нефтяного мазута) и моторных топлив требуется дополнительное применение процессов гидропереработки жидких угольных продуктов с целью уменьшения содержания серы и других нежелательных примесей. Наиболее легко перерабатывается «угольная нефть», получаемая в процессе каталитической гидрогенизации угля.

Альтернативным направлением производства синтетических жидких топлив является совмещение процессов получения из угля синтез-газа и его химической переработки.

Жидкие топлива из синтез-газа экологически намного безопаснее, чем топлива, получаемые прямым охижением угля. Последние содержат высокое количество канцерогенных полициклических соединений.

При высокотемпературной обработке твердого топлива в среде кислорода воздуха, водяного пара, диоксида углерода и водорода органические составляющие топлива нацело превращаются в газообразные продукты.

К настоящему времени освоены различные модификации промышленных процессов газификации углей, наиболее распространенными из которых являются технологии «Лургии» (стационарный слой кускового угля), «Винклера» (книющий слой угольных частиц), «Комперс-Тотцека» (пылеугольный поток), «Тексако» (водноугольная суспензия) и их различные модификации. На опытно-промышленном уровне сейчас отраба-

тывается 20 технологий газификации угля нового поколения, различные модификации процессов «Лурги», «Винклера», «Копперс-Тоттлер», «Тексако», «Ферко Силвагаз», «Атгаз», «Велмана-Галуши», технология комбинированного слоевого газификатора, технология внутрицикловой газификации угля, «Эксо», «Молтен Солт», «Патгаз», «Фишер-Тропшер», «Мобил», технологии газификации по проектам «Future Gen» и «Zero Gen», технология «Syngas» по проекту концерна «Shell», технология «Gas Schwarze Pumpe», разработанная фирмой «Siemens», «PGM», «Westinghouse Plasma Corporation», плазменная газификация «Bio Syn Gas» и другие технологии, которые рассмотрены ниже. Эффективность процессов газификации может существенно повышаться при использовании соответствующих катализаторов, позволяющих снижать температуру при сохранении высокой скорости процесса и регулировать состав продуктов.

Катализатор может ускорять как реакции прямого превращения углерода в газообразные соединения, так и газофазные реакции продуктов термического превращения угля. До настоящего времени преимущественно разрабатывали процессы каталитической газификации, основанные на ускорении реакций прямого превращения угля в газообразные соединения. В этих случаях для эффективного воздействия катализатора необходимо обеспечить его хороший контакт с твердым сырьем. Для этого используют катализаторы, наносимые на поверхность угля, а также способные плавиться или возгораться в условиях процесса, проникая в поры угля. Наиболее распространенными катализаторами процесса газификации углей являются соединения щелочных, щелочноземельных и некоторых переходных (Ni, Fe, Co) металлов.

Среди технологий, проходящих опытно-промышленную отработку, следует выделить в качестве наиболее перспективных процесс «Эксо» – каталитическая газификация угля водяным паром в кипящем слое, процесс «Молтен Солт» – парокислородная газификация при повышенном давлении в расплаве соды, процесс «Патгаз» – газификация при атмосферном давлении в расплаве железа. Применяемые расплавы играют роль теплоносителя и катализатора.

Применение катализаторов может быть сопряжено с появлением новых технологических проблем. Среди них следует выделить проблему разработки простых и надежных методов введения катализатора в реакционную смесь и извлечения его для повторного использования в процессе газификации. В выполненных с участием автора работах установлено, что эта проблема может решаться путем осуществления процесса газификации угля в кипящем слое частиц катализатора. В качестве каталитически активных материалов оказалось возможным использовать де-



шевые и доступные металлургические и котельные шлаки, которые содержат элементы (Fe, Ni, Mn и др.), способные катализировать реакции окисления, конверсии CO и углеводородов, метанирования. Такие каталитически активные материалы можно использовать в процессе газификации до их полного износа. В режиме циркуляции частиц мартевского шлака при температурах от 850 до 900 °С и атмосферном давлении паровоздушной смеси степень конверсии угля в газообразные продукты составляет 90 %, а интенсивность газификации превышает показатели известных технологий газификации, осуществляемых при аналогичных температурах и давлении.

## **11.2. Мировой опыт в применении технологий газификации угля в промышленности и народном хозяйстве**

В связи с ограниченностью запасов углеводородного топлива и существенным ростом мировых цен на него в последние годы, все более остро встает вопрос использования других экологически чистых технологий получения энергии и сырья для химической промышленности. Одним из таких решений может стать технология газификации угля. Повышенный интерес, вызванный усиленными в последнее время разработками в области газификации угля, в последние годы лишь подтверждает этот факт.

Ниже представлены одни из последних достижений и проектов в этой области.

Международный альянс энергетических компаний и государственных организаций работает в США над проектом газификации угля стоимостью 1,7 млрд долл.

Этот проект, поддерживаемый Департаментом энергетики, включает процесс улавливания CO<sub>2</sub> и его подземное хранение. Проект «Future Gen» был запущен в 2012 г. Он предусматривает производство электроэнергии, достаточной для снабжения 150 тыс. домов, а также производство водорода. Это будет одна из первых в мире электростанций с «нулевыми выбросами». Данный проект предусматривает несколько заводов по газификации угля в синтез-газ и улавливанием.

Аналогичный проект реализуется в Квинсленде (Австралия). В проекте «Zero Gen» для производства электроэнергии будет использоваться разработанная «Mitsubishi» технология газификации угля (рис. 11.1), а сам проект финансируется в основном правительством.

«Zero Gen» является чистым угольным энергетическим проектом, который интегрирует угольную газификацию (IGCC) с улавливанием и хранением углерода (CCS – carbon capture and storage) для получения синтез-газа с низкой эмиссией углекислого газа. Оба IGCC и CCS были

определены угольной промышленностью в сфере получения электроэнергии и тепла в качестве приоритетных технологий для развития.

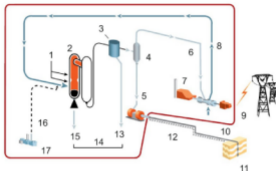


Рис. 11.1. Принципиальная схема электрической станции с системой улавливания  $CO_2$  («Zero Gen – Technology»):

- 1 – подача угля; 2 – газификатор; 3 – система синтез-газ очистки (стадии улавливания частиц пыли, удаления микрочастиц, сдвига синтеза-газа);
- 4 – удаление  $CO_2$ ; 5 – компрессор; 6 – «чистый» синтез-газ;
- 7 – комбинированный цикл газовой турбины; 8 – избыточный воздух газовой турбины;
- 9 – электричество в сеть; 10 – выведение  $CO_2$ ; 11 – безопасное захоронение  $CO_2$ ;
- 12 – транспортировка  $CO_2$ ; 13 – оборот фракции серной кислоты;
- 14 – использование побочного продукта; 15 – экологически инертные минеральные вещества; 16 – кислород; 17 – система воздухозабора и выделения кислорода

Проект будет включать IGCC электростанцию, оснащенный технологией CCS. Электростанцию планируют разместить рядом с электростанцией Stanwell в центре Квинсленда, где будет использоваться процесс газификации. В газификаторе уголь катализируется смесью кислорода и водяного пара под давлением для получения богатого водородом синтез-газа, который используется в мощных газовых турбинах, которые генерируют электричество.

Углекислый газ ( $CO_2$ ) удаляется из синтез-газа и транспортируется на 220 км, где он экологически безопасно захоранивается в глубоких подземных резервуарах.

Одним из мировых лидеров на сегодняшний день в газификации угля является концерн «Shell», имеющий наибольшее в мире количество

проектов по превращению угля в газ с целью выработки электроэнергии. Технологий газификации угля несколько. И именно с этими технологиями лидеры в области газификации угля – США, Япония, Китай, Германия – связывают в настоящее время так называемое «второе рождение угля».

К 2011 г. только компания «Shell» начала реализацию новых 37 проектов по газификации угля с целью выработки на основе технологии «Syngas» («SyntheticGas») электроэнергии, а также продала 27 лицензий на такие технологии. А средняя мощность электростанции при этом составляет от 500 до 800 МВт.

Следовательно, вскоре, а срок строительства завода-газификатора с целью выработки электроэнергии не превышает года, мир получит еще от 32 000 до 51 200 МВт общей мощности электростанций, которые будут работать на газифицированном угле.

Другими словами, доля «Syngas» в мировом топливно-энергетическом балансе (ТЭБ) с высокой вероятностью, в ближайшем будущем возрастет до 1...1,4 %.

Разрабатываемая фирмой «Siemens» электростанция, работающая на основе «Gas Schwarze Pumpe» (GSP) процесса, будет рассчитана на использование различных видов топлива, включая антрациты, отходы нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) и лигниты. По заявлению представителей компании, процесс газификации GSP, использующий кислородное дутье, позволяет подавать топливо пневматически либо в виде водной суспензии.

«General Electric» совместно с компанией «Bechtel» на создающейся опытно-промышленной установке с газификатором компании «Техасо» прогнозирует уровень выбросов, существенно меньший, чем на энергоблоках с пылеугольными котлами на сверхкритических параметрах (СКП). По заявлению производителя, уровень выбросов приблизится к парогазовой установке (ПГУ). Проектная мощность электростанции составляет 630 МВт, используется газовая турбина типа 7FB. Планируемый коэффициент использования установленной мощности составит 85 % при работе только на угле и 93 % с использованием резервного топлива. При сжигании битуминозных и коксующихся углей электростанция обеспечит коэффициент полезного действия (КПД) «нетто» около 39 %. Под КПД «нетто» подразумевается итоговая эффективность работы электростанции с учетом всего энергопотребления на собственные нужды.

Компании «GE Energy» и «Nexterra» разработали проект энергогенерирующего комплекса на базе оборудования газификации угля и биомассы (рис. 11.2).



Система газификации Siemens на заводе фабрики Kruger Products в Нью-Вестминстере В.С.

*Рис. 11.2. 3D-модель энергосервирующего комплекса с газификацией угля и биомассы*

Другой всемирно известный холдинг «Mitsubishi», в т. ч. в области альтернативных источников энергии, уже несколько лет ведет активные работы в области создания современного оборудования газификации угля. «Mitsubishi», построившая в Японии в начале 90-х годов прошлого века пилотную установку на газификации с воздушным дутьем, сейчас разрабатывает очередную ПГУ с газификацией угля. Эта компания, в отличие от «GE» и «Siemens», сделала выбор в пользу газификации с воздушным дутьем. Такая технология не требует создания мощных сепараторов, необходимых для получения кислорода и потребляющих значительное количество электроэнергии.

Этот факт, а также отказ от использования водоугольной суспензии (ВУС) в качестве метода подачи топлива, подразумевающий в дальнейшем испарение воды, повышает общую эффективность энергоустановки. Используя газовую турбину M501F в своих ПГУ с газификацией, «Mitsubishi» планирует достигнуть КПД «нетто» на уровне 45 %, а в дальнейшем, при использовании пароохлаждаемой турбины M501G, 48 %.

В Испании эксплуатируется электростанция, которая работает на синтез-газе, произведенным из кокса (рис. 11.3).

Немецкая энергетическая компания «RWE Power» выделила на разработку подобных технологий 1 млрд евро. Первая твердотопливная электростанция данной компании мощностью 450 МВт, газифицирующая рейнские бурые и каменные угли, введена в 2014 г.



*Рис. 11.3. Машинный зал испанской электростанции, работающей на коксовом газе*

Примером серьезного государственного отношения к технологиям газификации конденсированных топлив, прежде всего каустобиолитов, может служить и Великобритания. Так, в электронных СМИ прошло сообщение о том, что в ноябре 2010 года фирма «ReneTech», которая специализируется на производстве синтетических видов топлив, подписала соглашение о намерениях с американской биоэнергетической группой «Solena», которая подразумевает использование технологии Фишера–Тропша на заводе по производству синтетического топлива в восточной части Лондона.

Завод под названием «Green Sky» ежегодно перерабатывает около 500 тыс. тонн биомассы в синтетический газ. Впоследствии этот газ будет перерабатываться в объеме 60,6 млн литров синтетического авиационного турбореактивного топлива. Ранее в этом же году авиакомпания

«British Airways» подписала соглашение о намерениях, подразумевающее покупку всего топлива, производимого на данном заводе.

Компания «Power Fuels Ltd» сообщила о своем намерении использовать газо- и паротурбинные технологии компании «GEEnergy» при строительстве электростанции комбинированного цикла с газификацией угля (технология IGCC) и практически нулевой токсичностью рядом с существующей угольной шахтой в местечке Хэтфилд, Южный Йоркшир, Великобритания. Электрическая станция мощностью 900 МВт была запущена в эксплуатацию в конце 2011 г., а в 2013 г. переведена на синтетический горючий газ. Такой подход обеспечивает возможность поэтапного внедрения газовых турбин комбинированного цикла и оборудования «Gasification Island».

В Канаде реализуется несколько проектов газификации, которые должны обеспечить снабжение паром и водородом сектора производства синтетической нефти из сырья, добытого из нефтяных песков. Кроме того, специалисты бумажной промышленности исследуют возможность использования продуктов газификации для повышения эффективности своей работы и уменьшения количества отходов.

В настоящее время в мире находятся в эксплуатации более 100 генераторных установок, работающих по технологической схеме Лурги. Так, в Чехии генераторный газ, получаемый в газогенераторах данного типа в количестве 200 000 м<sup>3</sup>/ч, сжигается в газотурбинных энергетических установках. В ЮАР действует три крупных завода, которые удовлетворяют 47 % потребности страны в жидких топливах. По-прежнему находится в эксплуатации и практически является полигоном для исследований газовый завод «Шварценлуме» в Германии.

В США на заводе «Великие равнины» производят заменитель природного газа и транспортируют их совместно по общей газопроводной системе.

Находящиеся в Китае предприятия газификации угля компании «GE» производят генераторный газ (ГГ) в качестве сырья для получения химикатов и удобрений, а также водорода для НПЗ.

В настоящий момент в мире уже успешно эксплуатируется множество установок по газификации угля в различных областях промышленности (табл. 11.1).

Из данной таблицы видно, что мировыми лидерами по числу проектов по газификации являются Китай (46 объектов), США (26 объектов) и Германия (20 объектов). При этом по преобразованию угля в синтетический газ «Syngas» работают всего 30 заводов, общей мощностью 13,4 ГВт. Все остальные проекты предназначены для производства химических продуктов из угля: аммония, водорода, метанола, искусственного сжиженного моторного топлива.

Таблица 11.1

Список действующих в мире заводов по газификации угля на 2017 г.

Страна	Заводы	Мощность, МВт	Продукция
Австралия	1 завод: SasolChemicalIndustries	110,0	Водород
Бразилия	2 завода: CNOOC, Sinopec	519,5 (суммарно)	Аммоний и электроэнергия соответственно
Канада	1 завод: CNPC	1025,0	Водород, тепловая энергия
Китай	46 заводов: CNOCC, Sinopec, Shell, Linde	12918,0 (суммарно)	Аммоний, газ для котельных, метанол, водород для производства сжиженного моторного топлива и электроэнергии
Чехия	3 завода: Nippon	1915,9 (суммарно)	Метанол, аммоний, электроэнергия и тепло
Доминиканская республика	1 завод: французская Nitrogen	196,9	Газ для закачки в пласт
Египет	1 завод: Suez	106,4	Аммоний
Финляндия	5 заводов: финские компании муниципального профиля	169,0 (суммарно)	Аммоний, электроэнергия для бытовых нужд
Республики б. Югославия	2 завода: местные муниципалитеты	226,9 (суммарно)	Аммоний, метанол
Франция	2 завода: китайская химическая компания Jilin	118,8 (суммарно)	Электроэнергия, кислородосодержащие химикаты
Германия	20 заводов: BASF, Mitsui, муниципальные компании	5071,1 (суммарно)	Электроэнергия, метанол, аммоний, химикаты, моторное топливо
Индия	7 заводов: Exxon, муниципальные компании Германии	2086,6 (суммарно)	Электроэнергия, метанол, аммоний
Италия	7 заводов: Exxon, муниципальные компании Германии и Италии	4509,0 (суммарно)	Электроэнергия
Япония	6 заводов: Sinoso (США), NFL (Индия), муниципальные компании Японии	1326,0 (суммарно)	Аммоний, электроэнергия, метанол, улавливание

Страна	Заводы	Мощность, МВт	Продукция
Малайзия	1 завод: правительство страны	1032,4	Дистилляты
Нидерланды	3 завода: BP, TexasEastman	1187,2 (суммарно)	Электроэнергия, водород
Португалия	2 завода: BP, Samsung	1103,2 (суммарно)	Аммиак
Катар	1 завод: португальская Portucel	10936,0	Дистилляты, парафины
Сингапур	2 завода: немецкая DEA AG	583,7 (суммарно)	Электроэнергия, водород
ЮАР	3 завода: владельцы – AGIP, Sasol	2380,2 (суммарно)	Моторное топливо, водород
Южная Корея	3 завода: владельцы – Shell, Sinorec	202,9 (суммарно)	Аммиак, электроэнергия
Испания	2 завода: владельцы – муниципалитеты	609,8	Электроэнергия, улавливание CO
Швеция	3 завода: владельцы – муниципалитеты	68,7 (суммарно)	Электроэнергия, улавливание CO
Тайвань	2 завода: владелец – американская Lake Charles	440,6 (суммарно)	Метанол
Великобритания	2 завода: владельцы – Shell, Sinorec	334,7 (суммарно)	Ацетилены
США	26 заводов: основные владельцы – BP, Samsung, Sinorec, Shell, Portucel, Indian oil Corp., AGIP	7761,3 (суммарно)	Улавливание CO, метанол, моторное топливо, аммиак, электроэнергия, водород, дистилляты, химикаты, газ для закачки в пласт

В ходе анализа можно сделать вывод, что развитие технологий газификации угля позволит решить множество как экономических, так и экологических проблем в ближайшем будущем. Этим и объясняется повышенный интерес к технологиям со стороны ведущих мировых энергетических концернов.

Однако, повсеместному внедрению технологий в настоящий момент препятствует как недостаток опыта в эксплуатации, так и слабая теоретическая база в описании процессов газификации. Поэтому успешной реализации крупных проектов в области газификации требуется активное развитие и взаимодействие этих двух составляющих.



## 11.3. Технология выработки электрической и тепловой энергии с помощью газификации угля

### 11.3.1. Тепловые электростанции с технологией газификации угля

Наибольшее распространение в России и мире получили технологии газификации твердых топлив в потоке (в том числе в вихревом потоке), в плотном слое и «кипящем». По данным сотрудников ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (г. Екатеринбург) эти технологии в зависимости от видов конденсированных топлив (КТ) соотносятся между собой в пропорциях, указанных на рис. 11.4.

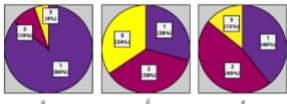
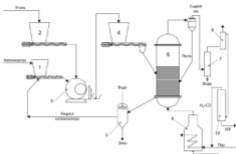


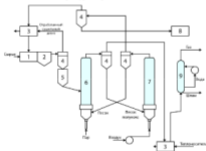
Рис. 11.4. Соотношение основных технологий газификации  
1 – поток; 2 – плотный слой; 3 – «кипящий» слой для твердых топлив:  
а – каустобиологитов; б – биомассы; в – отходов

К данному моменту освоены различные виды модификаций промышленных процессов на основе газификации конденсированных топлив, наиболее распространенными из которых являются технологии Лурги (газификация под давлением в псевдостационарном слое кускового топлива), Винклера (газификация в псевдокипящем слое мелкозернистого топлива), «Эксо» (газификация в псевдокипящем слое мелкозернистого топлива в присутствии катализатора, рис. 11.5), «ФеркоСилвагаз» (газификация в псевдокипящем слое мелкозернистой биомассы, рис. 11.6), Конперса-Тотцска (газификация в потоке пылевидного топлива), «Моултен Солт» (газификация в расплаве соды, рис. 11.7), «Атгаз» (газификация в расплаве железа, рис. 11.8), Тексако (газификация водотопливной суспензии), Велмана-Галуши и их различные вариации и комбинации.

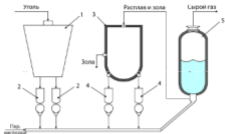
В мире отрабатывается еще несколько десятков технологий газификации нового поколения.



*Рис. 11.5. Схема газификации по технологии «Эксон» в псевдоожищем слое:  
 1 – бункер катализатора ( $K_2CO_3$ ); 2 – бункер угля; 3 – смеситель угля и катализатора;  
 4 – бункер смеси угля с катализатором; 5 – сепаратор золы и катализатора;  
 6 – реактор термохимической конверсии топлива; 7 – охладитель ГГ;  
 8 – подогреватель газифицирующего агента; 9 – очиститель;  
 10 – низкотемпературный разделитель компонентов ГГ*



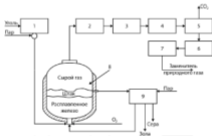
*Рис. 11.6. Схема газификации по технологии «Ферро Сивалгаз» в псевдоожищем слое:  
 1 – питатель; 2 – сушилка; 3 – бункер с дробилкой (сепаратор твердых частиц); 4 – циклоны  
 (сепараторы твердых частиц); 5 – бункер с дробилкой и запасом топлива;  
 6 – реактор термохимической конверсии топлива; 7 – тонна с псевдоожиженным  
 слоем; 8 – сборник зольного остатка; 9 – скруббер*



*Рис. 11.7. Схема газификации*

*по технологии «Моулен Сазит» в расплаве соды:*

- 1 – бункер угля; 2 – узловые насосы; 3 – устройство подготовки расплава соды; 4 – содовые насосы; 5 – реактор термохимической конверсии топлива



*Рис. 11.8. Схема газификации по технологии «Амгаз» в расплаве железа:*

- 1 – бункер угля (углеподготовка); 2 – теплообменник и устройство пылеулавливания ИГ; 3 – устройство колерования ИГ; 4 – устройство конверсии монооксида углерода (CO); 5 – устройство улавливания и отделения диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) из ИГ; 6 – устройство метатирования (синтез метана CH<sub>4</sub>); 7 – устройство улавливания и отделения водорода (H<sub>2</sub>) из ИГ; 8 – реактор термохимической конверсии топлива; 9 – устройство улавливания и отделения серы (S) из золяной остатка

В нашей стране получили известность также топки – газогенераторы системы ЦКТИ (топка В.В. Померанцева) с частичной газификацией (пироли-

зом, термализмом) древесного топлива. Известны также технологии газификации конденсированных топлив (ГКТ) (рис. 11.9) под высоким давлением, с использованием тепла атомных и термодерных реакторов, с погруженным теплообменниками, со встроенными плазмотронами и множество других.



Рис. 11.9. Схема глубокой комплексной переработки угля



Рис. 11.10. Технологическая схема процесса плазменной газификации отходов «Recovered Energy System»

Среди последних можно отметить технологию плазменной газификации «BioSynGas», разработанную американской фирмой «Solena», технологию «PGM», продвигаемую на территории России и стран СНГ ООО «ЭКО Прогресс Энерджи» («дочкой» российско-израильской компании «Environmental Energy Resources Ltd»), технологию «Westinghouse Plasma Corporation (WPC)» (представитель в России – ЗАО «ТБК Инновации»), а также отечественные технологии плазменной газификации твердых отходов Московского радиотехнического института РАН, ЗАО «ТЕХНОБИЗНЕСКОНТРОЛЬ ИННОВАЦИИ» и Института электрофизики и электроэнергетики РАН (рис. 11.10, 11.11).



*Рис. 11.11. Реактор-газификатор плазменной установки ИЭЭ РАН:*

- 1 – узел загрузки;*
- 2 – бункер накопительный;*
- 3 – генератор плазмы;*
- 4 – шихта реактора;*
- 5 – отверстия ввода дополнительного дутья;*
- 6 – датчики температуры;*
- 7 – выход продукт-газа (плазменного газа);*
- 8 – вращающийся колосник;*
- 9 – водяной затвор*

### **11.3.2. Модульные установки. Оборудование газификации конденсированных топлив (ГКТ)**

Наиболее перспективной областью в применении вышеуказанных технологий является создание модульных установок на базе того или иного газогенератора

В настоящее время в России и в мире в целом работы при создании оборудования газификации конденсированных топлив (ГКТ) имеют два подхода конструирования, различающиеся в конечном счете по степени заводской готовности:

### *1. Создание крупногабаритного оборудования ГКТ.*

Основной характеризующий признак, отличающий это оборудование – сравнительно большая единичная электрическая (как правило, от 1,0 до 1,5 МВт) и тепловая (как правило, от 2,0 до 3,0 Гкал/час) мощность. «Платой» – это невысокая заводская готовность поставляемого оборудования и, как следствие, необходимость проведения строительно-монтажных работ, в т. ч. устройство фундаментов, а также большого объема пуско-наладочных работ при вводе оборудования в эксплуатацию (средняя трудоемкость не менее 3000 чел·часов). Кроме того, транспортирование крупногабаритного оборудования вызывает определенные сложности и приводит в большинстве случаев к удорожанию логистической составляющей в структуре цены поставки (по сравнению с модульным оборудованием).

Наиболее рациональное применение данного оборудования – переработка конденсированных бытовых, промышленных и сельскохозяйственных отходов с получением некоторого количества тепловой и/или электрической энергии (как правило, путем подмешивания к природному газу или иному топливу и в первую очередь для собственных нужд организаций, эксплуатирующих оборудование ГКТ).

Предполагаемые места эксплуатации – крупные населенные пункты (или их окрестности) с развитой инфраструктурой, в т. ч. с централизованными системами тепло- и электроснабжения, не в полной мере удовлетворяющими имеющиеся потребности по приемлемым ценам, близости от источников образования отходов различного происхождения. В качестве примера можно привести комплекс противоточной газификации в плотном слое номинальной производительностью 2 т твердого топлива в час, смонтированный в 2003 г. на территории ФГУП НИЦ газотурбостроения «Салют» (г. Москва), и находящийся по настоящее время в опытно-промышленной эксплуатации. Данный комплекс создан на основе технологии газификации в сверхadiaбатическом режиме ИПХФ РАН в г. Черноголовке.

### *2. Создание компактного модульного оборудования ГКТ.*

Основной характеризующий признак, отличающий модульное оборудование, – сравнительно небольшая единичная электрическая (как правило, до 500 кВт) и тепловая (как правило, до 1,0 Гкал/час) мощность.

Вместе с тем компания «БиоРЕКС» (г. Москва), предлагает модульный локальный энергетический комплекс «ЛЭК-2000» (рис. 11.12) на базе оборудования газификации в вихревом потоке номинальной производительностью 2 т твердого топлива в час, электрической и тепловой мощностью 2 МВт и 3,5 Гкал/ч соответственно.



*Рис. 11.12. Локальный энергетический комплекс «ЛЭК-2000»  
ООО «БиоРЕКС»*

Главным преимуществом модульных комплексов является их высокая заводская готовность и, как следствие, отсутствие необходимости проведения строительно-монтажных работ, а также малый объем пусконаладочных работ при вводе оборудования в эксплуатацию. Например, время развертывания твердотопливной электростанции ТЭС-100, состоящей из трех модулей, на неподготовленной грунтовой площадке силами бригады из четырех человек составляет не более 24 часов, а средняя трудоемкость – 64 чел.-ч.

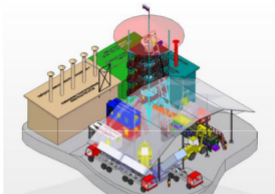
Кроме того, транспортирование модульного оборудования, выполняемого, как правило, в габаритах 20- либо 40-футовых стандартных контейнеров, не вызывает каких-либо сложностей при использовании любых видов транспорта и приводит в большинстве случаев к удешевлению логистической составляющей в структуре цены поставки (по сравнению с крупногабаритным оборудованием).

Наиболее рациональное применение данного оборудования – использование в рамках концепции распределенной энергогенерации («distributed power generation» в английской терминологии).

Данная концепция предусматривает децентрализованное распределенное преобразование химической энергии местных углеводных конденсированных топлив (КТ) в тепловую и/или электрическую энергию (в т. ч. в составе локальных сетей энергоснабжения), используя в качестве промежуточного энергоносителя горячий ГТ, получаемый при газификации этих топлив.

Твердотопливная электростанция ТЭС-100 номинальной мощностью 100 кВт, созданная ФГУП «НПЦГ Салют», показана на

рис. 11.13, а модуль прямоточной газификации угля в плотном слое из ее состава – на рис. 11.14.



*Рис. 11.13. Твердотопливная электростанция ТЭС-100 разработки ФГУП «НППГ Салют»*



*Рис. 11.14. Модуль газификации угля из состава твердотопливной электростанции ТЭС-100*



В силу объективных причин (прежде всего, в связи с единичным выпуском) себестоимость твердотопливных электростанций пока значительно превышает себестоимость аналогичных энергогенерирующих комплексов, работающих на продуктах нефтепереработки и природном газе, выпускаемых серийно. Поэтому экономическая целесообразность применения такого оборудования напрямую зависит от эксплуатационных расходов, прежде всего от разницы между стоимостью жидких, газообразных и твердых топлив. В связи с этим предполагаемые места эксплуатации твердотопливных электростанций – это, как правило, небольшие населенные пункты с неразвитой инфраструктурой, в т. ч. без централизованных систем тепло- и электроснабжения, расположенные в отдаленных районах Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера, а также других регионов с высокой стоимостью жидких и газообразных видов топлива.

Кроме того, модульные электростанции могут быть востребованы геологическими партиями, археологическими экспедициями, учреждениями ФСИН, в местах добычи полезных ископаемых, на лесозаготовительных участках и т. п.

Наконец, учитывая авиатранспортабельность и малое время развертывания, в т. ч. силами МЧС, модульные электростанции могут быть использованы для оперативного восстановления энергоснабжения и снижения ущерба от аварий и катастроф природного и техногенного характера, сопряженных с выходом из строя существующих систем энергоснабжения.

Мобильность модульного оборудования может быть повышена при установке его непосредственно на шасси автомобильных транспортных средств, на железнодорожной подвижной состав, на палубах и в трюмах плавсредств.

### **Вопросы и задания к главе 11**

1. Что получается в результате взаимодействия газифицирующего агента и газифицируемого материала?
2. В каких странах исследования процессов газификации и горения твердых топлив широко проводятся в течение последних десятилетий?
3. Опишите основные технологии глубокой переработки угля.
4. Назовите наиболее известные действующие в мире заводы по газификации угля.
5. Назовите основные технологии газификации топлив.
6. Опишите схему газификации по технологии «Эксон» в псевдоожиженном слое.

7. Опишите схему газификации по технологии «Ферко Силвагаз» в псевдоожженном слое.
8. Опишите схему газификации по технологии «Атгаз» в расплаве железа.
9. Опишите схему газификации по технологии газификации отходов «Recovered Energy System».
10. Опишите принцип работы реактора-газификатора плазменной установки.

## 12. ЭНЕРГИЯ ВОДОРОДА

Водород – самый простой и легкий из всех химических элементов – можно считать идеальным топливом. Он имеется всюду, где есть вода. При сжигании водорода образуется вода, которую можно снова разложить на водород и кислород, причем этот процесс не вызывает никакого загрязнения окружающей среды. Водородное пламя не выделяет в атмосферу продуктов, которыми неизбежно сопровождается горение любых других видов топлива: углекислого газа, окиси углерода, сернистого газа, углеводородов, золы, органических перекисей и т. п. Водород обладает очень высокой теплотворной способностью: при сжигании 1 г водорода получается 120 Дж тепловой энергии, а при сжигании 1 г бензина – только 47 Дж.

Водород можно транспортировать и распределять по трубопроводам, как и природный газ. Трубопроводный транспорт топлива – самый дешевый способ дальнейшей передачи энергии. К тому же трубопроводы прокладываются под землей, что не нарушает ландшафта. Газопроводы занимают меньше земельной площади, чем воздушные электрические линии. Передача энергии в форме газообразного водорода по трубопроводу диаметром 750 мм на расстояние свыше 80 км обойдется дешевле, чем передача того же количества энергии в форме переменного тока по подземному кабелю. На расстояниях больше 450 км трубопроводный транспорт водорода дешевле, чем использование воздушной линии электропередачи постоянного тока.

Водород – синтетическое топливо. Его можно получать из угля, нефти, природного газа либо путем разложения воды. Согласно оценкам, сегодня в мире производят и потребляют около 20 млн т водорода в год. Половина этого количества расходуется на производство аммиака и удобрений, а остальное – на удаление серы из газообразного топлива, в металлургии, для гидрогенизации угля и других топлив. В современной экономике водород остается скорее химическим, нежели энергетическим сырьем.

Сейчас водород производят главным образом (около 80 %) из нефти. Но это неэкономичный для энергетики процесс, потому что энергия, получаемая из такого водорода, обходится в 3,5 раза дороже, чем энергия от сжигания бензина. К тому же себестоимость такого водорода постоянно возрастает по мере повышения цен на нефть.

Небольшое количество водорода получают путем электролиза. Производство водорода методом электролиза воды обходится дороже, чем выработка его из нефти, но оно будет расширяться и с развитием

атомной энергетики станет дешевле. Вблизи атомных электростанций можно разместить станции электролиза воды, где вся энергия, выработанная электростанцией, пойдет на разложение воды с образованием водорода. Правда, цена электролитического водорода останется выше цены электрического тока, зато расходы на транспортировку и распределение водорода настолько малы, что окончательная цена для потребителя будет вполне приемлема по сравнению с ценой электроэнергии.

Сегодня исследователи интенсивно работают над удешевлением технологических процессов крупнотоннажного производства водорода за счет более эффективного разложения воды, используя высокотемпературный электролиз водяного пара, применяя катализаторы, полупроницаемые мембраны и т. п.

Большое внимание уделяют термолитическому методу, который (в перспективе) заключается в разложении воды на водород и кислород при температуре 2500 °С. Но такой температурный предел инженеры еще не освоили в больших технологических агрегатах, в том числе и работающих на атомной энергии (в высокотемпературных реакторах пока рассчитывают лишь на температуру около 1000 °С). Поэтому исследователи стремятся разработать процессы, протекающие в несколько стадий, что позволило бы вырабатывать водород в температурных интервалах ниже 1000 °С.

В 1969 г. в итальянском отделении «Евратома» была пущена в эксплуатацию установка для термолитического получения водорода, работающая с КПД 55 % при температуре 730 °С. При этом использовали бромистый кальций, воду и ртуть. Вода в установке разлагается на водород и кислород, а остальные реагенты циркулируют в повторных циклах. Другие сконструированные установки работали при температурах 700...800 °С. Как полагают, высокотемпературные реакторы позволят поднять КПД таких процессов до 85 %. Сегодня мы не в состоянии точно предсказать, сколько будет стоить водород. Но если учесть, что цены всех современных видов энергии проявляют тенденцию к росту, можно предположить, что в долгосрочной перспективе энергия в форме водорода будет обходиться дешевле, чем в форме природного газа, а возможно, и в форме электрического тока.

Когда водород станет столь же доступным топливом, как сегодня природный газ, он сможет всюду его заменить. Водород можно будет сжигать в кухонных плитах, в водонагревателях и отопительных печах, снабженных горелками, которые почти или совсем не будут отличаться от современных горелок, применяемых для сжигания природного газа.

При сжигании водорода не остается никаких вредных продуктов сгорания. Поэтому отпадает нужда в системах отвода этих продуктов

для отопительных устройств, работающих на водороде. Более того, образующийся при горении водяной пар можно считать полезным продуктом – он увлажняет воздух (как известно, в современных квартирах с центральным отоплением воздух слишком сух). Отсутствие дымоходов не только способствует экономии строительных расходов, но и повышает КПД отопления на 30 %.

Водород может служить и химическим сырьем во многих отраслях промышленности, например при производстве удобрений и продуктов питания, в металлургии и нефтехимии. Его можно использовать и для выработки электроэнергии на местных тепловых электростанциях.

Важными преимуществами водорода являются высокая теплоотворная способность и экологическая чистота и технологичность получения из него электрической энергии с помощью топливного элемента (ТЭ). Последний представляет собой электрохимический генератор, осуществляющий прямое преобразование химической энергии в электрическую. При этом единственным продуктом реакции (кроме электрической энергии и теплоты) является вода.

При другом способе получения энергии из водорода – его сжигании – единственным побочным продуктом также является вода, а основным – тепло. Намечившиеся и частично апробированные технологии и сферы применения водорода (кроме энергетики) настолько широки (транспорт, химическая и пищевая промышленность, металлургия и др.), что речь идет фактически о переходе не только к водородной энергетике, но и к водородной экономике.

В конце прошедшего столетия в промышленно развитых странах работы в области водородной энергетики отнесены к приоритетным направлениям развития науки и техники и сегодня находят всё большую поддержку со стороны как государственных структур, так и частного бизнеса. Анонсированы и приняты крупные государственные программы научных исследований и разработок в области водородной энергетики. В перспективе это приведет к существенным изменениям ТЭБ и формированию нового крупного международного рынка водородных технологий и энергоносителей, что будет иметь значительные социально-экономические и политические последствия для всего мира.

Основным инициатором всплеска интереса к водороду как энергоносителю является автомобильная промышленность. Достоинства водорода здесь настолько очевидны, что автомобилестроители ведущих стран вкладывают огромные средства в исследования и разработки в области водородных технологий. Разработаны и появились на рынке автомобили, оснащённые водородным двигателем. В ряде крупных городов Западной Европы прошли испытания городских автобусов

на топливных элементах. В России широкомасштабное использование водородного топлива ожидается к середине столетия.

Стационарная энергетика (в первую очередь автономная, а в последние годы и системная) стала проявлять интерес к водородной энергетике и к топливным элементам (ТЭ) как к ее технологической основе в связи с быстрым ростом мощности ТЭ и намечившейся тенденцией к снижению стоимости производства водорода. Привлекательной для энергетики является также возможность передачи водорода от централизованного производителя к удалённым потребителям по холодным трубопроводам. При этом потери энергии существенно ниже в сравнении с трубопроводными системами теплоснабжения.

Топливные элементы представляют собой устройства для превращения энергии топлива в электрическую энергию и частично в тепло без вовлечения процесса его сжигания. Схема топливного элемента показана на рис. 12.1.

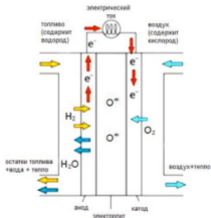


Рис. 12.1. Принципиальная схема топливного элемента

С упрощенной точки зрения их можно рассматривать как объединение в одном устройстве батарей (гальванического элемента), служа-

щей для прямого превращения энергии химической реакции в электрическую энергию и теплового двигателя, нуждающегося в непрерывной подаче топлива и окислителя (воздуха). По этой причине топливные элементы иногда называют электрохимическими генераторами. От электрических аккумуляторов топливные элементы отличаются тем что, они функционируют до тех пор, пока топливо и окислитель поступают из внешнего источника, при этом химический состав электролита в процессе работы не изменяется, т. е. топливный элемент не нуждается в перезарядке. Существуют различные виды топливных элементов, ориентированных на определенное применение и изготавливаемых из соответствующих материалов, однако процесс получения энергии в них идентичен, а различия касаются материалов электродов и электролита (табл. 12.1).

Таблица 12.1

*Характеристики топливных элементов*

Тип ТЭ	ТНТЭ (твердо-полимерные)	ЩТЭ (щелочные)	ФКТЭ (фосфорно-кислотные)	КРТЭ (карбонатно-растворные)	ТОТЭ (твердоокисные)
Температура, °С	80...100	65...250	150...220	600...1000	600...1000
Материал: анода	Pt/C, Pt-Ru/C	Pt/C, Pt-Co/C, Pt-Pt-Pd/C	Pt/C, Pt-Ru/C	Ni-Al, Ni-Cr	Ni, NiO
катода	Pt/C	Ni (Pt)	Pt/C, Pt-WO <sub>3</sub> /C	LiFeO <sub>2</sub>	LaSrMnO <sub>3</sub>
электро- лита	Полимерная мембрана (полимер)	KOH/NaOH на носителе	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> на носителе	LiKCO <sub>3</sub> , LiNaCO <sub>3</sub> на носителе	ZrO <sub>2</sub> , CeO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Диапазон мощностей	0,01...100 кВт	~100 кВт	~100 кВт	≥1 МВт	≥1 МВт
Ресурс, ч	до 2·10 <sup>4</sup>	до 1·10 <sup>4</sup>	до 5·10 <sup>4</sup>	до 2·10 <sup>4</sup>	до 6·10 <sup>4</sup>

Химические реакции в ТЭ идут на пористых электродах, водород поступает на анод топливного элемента, где его атомы разлагаются на электроны и протоны. Электроны поступают во внешнюю цепь, создавая электрический ток. Протоны, в свою очередь, проходят сквозь протонообменную мембрану на катодную сторону, где с ними соединяется кислород и электроны из внешней электрической цепи с образованием воды. Побочными продуктами реакции, таким образом, являются тепло и водяной пар.

### Вопросы и задания к главе 12

1. Перечислите преимущества генераторов на базе ТОТЭ.
2. Перечислите характеристики топливных элементов.
3. Какие существуют области применения топливных элементов?
4. Дайте определение понятию «электрохимический генератор».
5. Перечислите основные элементы электрохимического генератора?
6. Какое экологическое воздействие оказывают генераторы на базе ТОТЭ на окружающую среду?



### 13. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Основу жизни человека составляет окружающая природная среда, а основу современной цивилизации – ископаемые природные ресурсы и вырабатываемая из них энергия, включая самые технологичные ее виды (тепловую и электрическую).

Промышленное производство электрической и тепловой энергии сопровождается крупномасштабным материальным и энергетическим обменом с окружающей средой, имеющим своим следствием отрицательное воздействие на нее и, следовательно, вызывающим необходимость ее защиты. Иначе говоря, электроэнергетика порождает свои экологические проблемы, специфически связанные с соответствующими областями производства электроэнергии: тепловой, гидравлической и атомной энергетикой.

Преобладающие позиции тепловой энергетики сохранятся, очевидно, и в обозримой перспективе. Поэтому будущее энергетики будет существенно зависеть от обеспечения допустимого уровня воздействия тепловых электростанций на окружающую среду.

Очевидно, что для оценки экологичности теплоэнергетики важное значение имеет структура топливного баланса тепловых электростанций. В топливном балансе ТЭС во всем мире в целом доминирующее положение занимает уголь. Так, уголь составляет свыше 70 % топлива, потребляемого в электроэнергетике в странах-членах организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР).

С экологической точки зрения тепловые электростанции представляют собой непрерывно действующие уже в течение десятков лет источники выбросов в атмосферу продуктов сгорания топлива и сбросов в водоемы большого количества низкопотенциального тепла.

Рассматривая воздействие ТЭС на атмосферу, растительный и животный мир, имеют в виду прежде всего выбросы тех веществ, на которые установлены ПДК в воздухе населенных мест. При сжигании природного газа это оксиды азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), оксид углерода ( $\text{CO}$ ) и бензапирен ( $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ), причем токсичность уходящих газов связана практически только с оксидами азота, т. к. концентрация бензапирена ничтожно мала. Образование оксида углерода при сжигании природного газа и мазута минимизируется путем рациональной организации топочного режима.

При сжигании твердого и жидкого топлива добавляются оксиды серы ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ) и зола, причем в серосодержащих топливах 97...98 %

серы окисляется до  $\text{SO}_2$ , а остальные 2...3 % – до  $\text{SO}_3$ . Поэтому все выбросы оксидов серы тепловыми электростанциями при оценке загрязнения атмосферного воздуха определяют в виде  $\text{SO}_2$ .

Сжигаемый на тепловых электростанциях России энергетический уголь имеет обычно низкое качество. Высокая зольность и влажность угля при практическом отсутствии обогащения вызывают значительные технические и экологические трудности при его сжигании в котлах. Это, в частности, явилось одной из причин снижения его использования.

На тепловых электростанциях России сжигаются угли многих месторождений, но основная часть приходится на угли кузнецкого, канско-ачинского, экибастузского и донецкого бассейнов.

Каждое топливо, в зависимости от его технологических характеристик (содержания серы, золы, теплоты сгорания) можно охарактеризовать условным (без учета радиационных характеристик минеральной части и токсичности содержащихся в топливе микроэлементов) и относительным (по отношению к наиболее чистому топливу – природному газу) показателем экологичности.

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, т. к. 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 90-х гг. 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Им, несомненно, станут ядерные источники.

Запасы урана, если, скажем, сравнивать их с запасами угля, вроде бы не столь уж и велики. Но зато на единицу веса он содержит в себе энергии в миллионы раз больше, чем уголь.

Итог таков: при получении электроэнергии на АЭС нужно затратить в сто тысяч раз меньше средств и труда, чем при извлечении энергии из угля. И ядерное горючее приходит на смену нефти и углю... Всегда было так: следующий источник энергии был и более мощным. То была, если можно так выразиться, «воинствующая» линия 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 высокоэнергетических энергоносителей – нефти, природного газа, урана – 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.

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 концессии Минтопэнерго освоению НВИЭ отводится третьестепенная, вспомогательная роль. Несомненно, это положение скажется на экономическом отставании страны.

Специалистам в области энергетики предстоит большие работы в области освоения НВИЭ и совершенствования методов энергосбережения, аккумулирования 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, и 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 СОКРАЩЕНИЙ

- АОТЭС – арктическая океаническая тепловая электрическая станция.  
АЭС – атомная электрическая станция.  
ВК – ветроколесо.  
ВНП – валовый национальный продукт.  
ВЭР – вторичные энергоресурсы.  
ВЭС – ветровая электрическая станция.  
ВЭУ – ветровая электроустановка.  
ГАЭС – гидроаккумулирующие станции.  
ГеоТЭС – геотермальная тепловая электрическая станция.  
ГРЭС – городская районная электрическая станция.  
ГТС – геотермальная тепловая станция.  
ГТУ – газотурбинная установка.  
ГЭС – гидроэлектростанция.  
ДГУ – детандер-генераторные установки.  
ДЭС – дизельная электрическая станция.  
КПД – коэффициент полезного действия.  
КУ – котлы-утилизаторы.  
МГЭС – малые гидроэлектростанции.  
МНИЭ – Министерство нетрадиционных источников энергии.  
МПЦ – многократная принудительная циркуляция.  
МЭА – Международная энергетическая ассоциация.  
НВИЭ – нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.  
НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.  
ОТЭС – океаническая тепловая электрическая станция.  
ОЦР – органический цикл Ранкина.  
ОЭСР – организации экономического сотрудничества и развития.  
ПВС – пароводяная смесь.  
ПДК – предельно допустимая концентрация.  
ПЭС – приливная электрическая станция.  
РТ – рабочее тело.  
СЭС – солнечная электрическая станция.  
ТЭК – топливно-энергетический комплекс.  
ТЭО – технико-экономическое обоснование.  
ТЭР – топливно-энергетические ресурсы.  
ТЭС – тепловая электрическая станция.

ТЭЦ – тепловая электроцентрль.

ФЭЦ – Федеральный центр малой и нетрадиционной энергетики.

ЭДС – электродвижущая сила.

ОТЕС – Ocean Thermal Energy Conversion.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : курс лекций / В.А. Агеев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 294 с.
2. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика / А.Б. Алхасов ; ред. В.Е. Фортов. – Москва : Физматлит, 2010. – 256 с.
3. Андреев В.М. Фотозлектрическое преобразование солнечной энергии / В.М. Андреев // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 7. – С. 93–98.
4. Аунг В.М. Оценка ресурсов возобновляемых источников энергии в Мьянме : дис. ... канд. техн. наук / В.М. Аунг. – Москва : 2010. – 145 с.
5. Богословский В.Н. Отопление : учебник для вузов / В.Н. Богословский, А.Н. Сканин. – Москва : Стройиздат, 1991. – 735 с.
6. Валов М.И. Системы солнечного теплоснабжения / М.И. Валов. – Москва : Изд-во МЭИ, 1991. – 137 с.
7. Васильев Ю.С. Экология использования возобновляющихся энергоисточников / Ю.С. Васильев, Н.И. Хрисанов. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 343 с.
8. Великанов Н.Л. Гидросиловые установки и возобновляемые источники энергии / Н.Л. Великанов. – Калининград : Изд-во КГТУ, 2006. – 198 с.
9. Воробьев С.В. Инвестиционно-инновационный процесс в электроэнергетике : особенности и перспективы : дис. ... канд. экон. наук / С.В. Воробьев. – Москва, 2006. – 179 с.
10. Германович В. Альтернативные источники энергии и энергосбережение. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. Германович, А. Турилин. – Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2014. – 320 с.
11. Губин В.Е. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии в энергетике / В.Е. Губин, С.А. Косяков. – Томск : Изд-во НТЛ, 2002. – 252 с.
12. Дашикапов Б.Б. Альтернативные источники энергии. Получение газа из органической массы / Б.Б. Дашикапов // Молодежный вестник ИРГТУ. – 2012. – № 3. – С. 43.
13. Жигаренко В.М. Возобновляемые и вторичные источники энергии : учебное пособие / В.М. Жигаренко. – Мариуполь : ПГТУ, 2006. – 200 с.
14. Зангиев Т.Т. Методика оценки эффективности вовлечения возобновляемых источников энергии в энергетический баланс на основе системного подхода : дис. ... канд. техн. наук / Т.Т. Зангиев. – Краснодар, 2001. – 209 с.



15. Кейкиманова М.Т. Фотоэлектрические свойства р-п-перехода / М.Т. Кейкиманова, Ш.Н. Айтжанов // *Механика и технологии*. – 2015. – № 2. – С. 21–30.
16. Ковальчук Ю.Л. Состояние и перспективы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом комплексе России / Ю.Л. Ковальчук // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2006. – № 3. – С. 237–242.
17. Кожиченков В.С. Оценка потенциала развития ветроэнергетических установок в Москве / В.С. Кожиченков // *Русский инженер*. – 2012. – № 2 (33). – С. 66–69.
18. Копытов В.В. Газификация твердых топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития / В.В. Копытов // *Международный научный журнал альтернативная энергетика и экология*. – 2011. – № 6 (98). – 29–78.
19. Копытов В.В. Газификация конденсированных топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития / В.В. Копытов. – Москва: Инфра-Инженерия, 2012. – 504 с.
20. Копытов В.В. Газификация твердых топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития / В.В. Копытов // *Международный научный журнал альтернативная энергетика и экология*. – 2011. – № 6 (98). – С. 29–78.
21. Кузьмина Т.И. Инновационное развитие угольной отрасли РФ на основе реализации технологического потенциала комплексной переработки углей: дис. ... д-ра экон. наук / Т.И. Кузьмина. – Москва, 2012. – 372 с.
22. Лабейш В.Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / В.Г. Лабейш. – Санкт-Петербург: СЗТУ, 2003. – 79 с.
23. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. – Москва: Изд-во МЭИ, 2000. – 388 с.
24. Лигачев В.А. Лабораторная работа «Спектральная чувствительность и вольт-амперная характеристика солнечного элемента» по курсу «Физика и технология приборов на основе некристаллических полупроводников» / В.А. Лигачев, А.И. Попов. – Москва: Изд-во МЭИ, 1999. – 15 с.
25. Магомедов А.М. Возобновляемые источники энергии. Лабораторный практикум: учебное пособие для вузов / А.М. Магомедов. – Махачкала: ИПЦ ДГУ, 2005 – 246 с.
26. Макаров А.А. Тенденции развития мировой энергетики и энергетическая стратегия России / А.А. Макаров, В.Е. Фортов // *Вестник российской академии наук*. – 2004. – Т. 74. – № 3. – С. 195–208.
27. Мурутов В.П. Возможности использования возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве / В.П. Мурутов, Д.С. Стребков // *Теплоэнергетика*. – 1992. – № 4. – С. 27–29.

28. Основы современной малой энергетики: учебное пособие. В 3 томах. Том 3. / Э.П. Гужулев, В.В. Шалай, А.Н. Лямин и др. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2006. – 528 с.

29. Планковский С.И. Плазменные технологии утилизации ТБО. Современное состояние и перспективы / С.И. Планковский. – Режим доступа : <http://waste.uu.cooperation/2007/theses/plankovskiy.html> (дата обращения: 05.01.2015).

30. Паутов Д.Н. Взрывозащищённое электрооборудование технологических комплексов: учебное пособие / Д.Н. Паутов, Е.М. Костоломов, В.А. Котырин. – Тюмень : ТомГНГУ, 2015. – 99 с.

31. Плешка М.С. Тепловососные геосистемы отопления и горячего водоснабжения зданий / М.С. Плешка, П.М. Вырлан, Ф.И. Стратан и др. – Кишинев : Штиинца, 1990. – 122 с.

32. Прокопеня И.Н. Применение нетрадиционных источников в теплоснабжении : электронный учебно-методический комплекс / И.Н. Прокопеня, А.А. Матвишин. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/22819/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%BD%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D0%B8.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 15.10.2019).

33. Расчет долгосрочных характеристик системы солнечного теплоснабжения: методические указания к выполнению расчетной работы по дисциплине «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» / сост. В.А. Агеев. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2004. – 16 с.

34. Радченко, С.А. Теплотехника и энергетические машины: учебное пособие / С.А. Радченко, А.Н. Сергеев. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2015. – 630 с.

35. Родионов В.Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего / В.Г. Родионов. – Москва : ЭНАС, 2010. – 352 с.

36. Седелников А.В. Анализ и планирование режимов автономной ветроэнергетической системы в условиях неопределенности энергопотребителя: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Седелников. – Новосибирск, 2006. – 168 с.

37. Савченков С.Н. Управление использованием альтернативных источников энергии: дис. ... канд. экон. наук / С.Н. Савченков. – Москва : 2009. – 146 с.

38. Солдатова Н.Ф. Энергосектор: приоритеты в условиях неопределенности / Н.Ф. Солдатова, М.А. Баранова // Экономика и управление в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 39–41.

39. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
40. Технологии «Shell» для газификации угля. Альтернативные топлива, энергетика Project. – Режим доступа: [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=6429](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=6429) (дата обращения: 05.01.2015).
41. Тиматков В. Стратегическое значение технологии газификации угля / В. Тиматков. – Режим доступа: [http://www.ng.ru/ng\\_energiya/2007-04-10/13\\_coal.html](http://www.ng.ru/ng_energiya/2007-04-10/13_coal.html) (дата обращения: 15.10.2019).
42. Ткачук К.Е. Классификация солнечных коллекторов и их актуальность применения в Омской области / К.Е. Ткачук, Е.Р. Сивильца, Т.П. Матвиенко // Динамика систем, механизмов и машин. – 2012. – № 2. – С. 101–104.
43. Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики: учебное пособие / В.Я. Ушаков. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – 447 с.
44. Холодов П.П. Перспективы экономики Кузбасса в призме тенденций на мировом и внутреннем рынках сырья / П.П. Холодов // Экономика и предпринимательство. – 2014. – № 4-2 (45). – С. 419–423.
45. Шаймарданов А.А. Использование плоских солнечных коллекторов для отопления на территории Башкортостана / А.А. Шаймарданов, В.В. Репин // Инновационная наука. – 2016. – № 8-2. – С. 99–103.
46. Шершнев В. Солнечные системы теплоснабжения / В. Шершнев, Н. Дударев // Строительная инженерия. – 2006. – № 1. – Режим доступа: <https://www.vira.ru/exp/digests/digest20.html> (дата обращения: 30.10.2019).
47. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: справочное пособие / Л.Д. Богуславский, В.И. Ливчак, В.П. Титов и др.; под ред. Л.Д. Богуславского и В.И. Ливчака. – Москва : Стройиздат, 1990. – 624 с.
48. Эфендиев А.М. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / А.М. Эфендиев, А.А. Кожевников. – Саратов : Саратовский источник, 2015. – 230 с.
49. ГОСТ Р 51594–2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200026446> (дата обращения: 30.10.2019).
50. ГОСТ Р 51595–2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200005846> (дата обращения: 30.10.2019).
51. ГОСТ Р 51596–2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Методы испытаний. – Москва : Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200026447> (дата обращения: 30.10.2019).
52. ГОСТ Р 51237–98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200026449> (дата обращения: 30.10.2019).

53. ГОСТ Р 51991–2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200031494> (дата обращения: 30.10.2019).
54. РД 34.20.115–89. Методические указания по расчету и проектированию систем солнечного теплоснабжения. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294817/4294817300.htm> (дата обращения: 30.10.2019).
55. Ashworth P. What's in store : Lessons from implementing CCS / P. Ashworth, J. Bradbury, S. Wade, C.F.J. Ynke Feenstra, S. Greenberg, G. Hund, T. Mikunda // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2012. – Vol. 9. – P. 402–409.
56. Blake T. Sky turns green : Using its plasma gasification technology, Solena Fuels is set to build Europe's first plant to convert low-carbon urban waste into sustainable jet fuel / T. Blake // *Professional Engineering*. – 2014. – Vol. 27. – P. 61–62.
57. Cook P.J. Demonstration and Deployment of Carbon Dioxide Capture and Storage in Australia / P.J. Cook // 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. – 2009. – Vol. 1. – P. 3859–3866.
58. Garnett A. The ZeroGen Project – Managing Risk and Uncertainty / A. Garnett, C. Grieg, C. Wheeler // 10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. – 2011. – Vol. 4. – P. 5631–5638.
59. Jang D.H. Kinetic analysis of catalytic coal gasification process in fixed bed condition using Aspen Plus / D.H. Jang, H.T. Kim, C. Lee, S. Kim // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – Vol. 38. – P. 6021–6026.
60. Li Z.J. Performance study of coal-Water gasification process in a Texaco gasifier / Z.J. Li, X.Y. Zhang, Y.Q. Lian // *International Journal of Heat and Technology*. – 2014. – Vol. 32. – P. 201–204.
61. Mahapatra P. Design and control of an elevated-pressure air separations unit for IGCC power plants in a process simulator environment / P. Mahapatra, B.W. Bequette // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2013. – V. 52. – P. 3178–3191.
62. Simpson P. ZeroGen new generation power – a framework for engaging stakeholders / P. Simpson, P. Ashworth // 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. – 2009. – Vol. 1. – P. 4697–4705.
63. Van Eijck J. Current and future economic performance of first and second generation biofuels in developing countries / Eijck J. Van, B. Batidzirai, A. Faaij // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 135. – P. 115–141.
64. White V. The Air Products Vattenfall oxyfuel CO<sub>2</sub> compression and purification pilot plant at schwarze pumpe / V. White, A. Wright, S. Tappe, J. Yan // *Energy Procedia*. – 2013. – Vol. 37. – P. 1490–1499.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ .....	7
1.1. Традиционные источники энергии .....	7
1.2. Нетрадиционные источники энергии .....	10
2. ЗАПАСЫ И РЕСУРСЫ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ .....	12
3. ДИНАМИКА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ХОЗЯЙСТВА .....	16
4. МЕСТО НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ В УДОВЛЕТВОРЕНИИ ПОТРЕБНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА .....	22
5. ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА .....	28
5.1. Источник солнечного излучения, его интенсивность и определение потенциала использования .....	28
5.2. Перспективы использования энергии Солнца .....	29
5.3. Классификация солнечных энергетических установок .....	30
5.4. Физические основы процессов преобразования солнечной энергии .....	30
5.4.1. Термоэлектрические преобразователи .....	30
5.4.2. Фотоэлектрические преобразователи .....	31
5.4.3. Нагревание воды солнечным излучением .....	35
5.4.4. Другие применения солнечной энергии .....	38
5.5. Концентрирующие гелиоприемники .....	38
5.6. Солнечные коллекторы .....	40
5.7. Паротурбинные СЭС .....	43
6. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА .....	45
6.1. Энергия ветра и возможности ее использования .....	45
6.1.1. Происхождение ветра, ветровые зоны России .....	45
6.1.2. Перспективы использования энергии ветра .....	47
6.1.3. Запасы энергии ветра и возможности ее использования .....	49
6.2. Классификация ветроустановок по принципу работы .....	50
6.3. Производство электроэнергии с помощью ветроэнергетических установок .....	58
6.3.1. Характерные особенности ветрогенераторов .....	58
6.3.2. Классификация ветроэнергетических установок для производства электроэнергии .....	60
6.4. Минусы ветроэнергетики .....	61

6.5. ВЭС с точки зрения экологии .....	62
<b>7. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>65</b>
7.1. Тепловой режим земной коры .....	65
7.2. Виды и свойства геотермальных источников энергии .....	67
7.3. Методы и способы использования геотермального тепла .....	69
7.4. Состояние геотермальной энергетики в России .....	70
<b>8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВОДЫ .....</b>	<b>73</b>
8.1. Энергия рек .....	73
8.2. Энергетические ресурсы океана .....	74
8.3. Энергетические установки по использованию энергии океана .....	76
8.3.1. Использование тепловой энергии океана .....	76
8.3.2. Использование перепада температур океан–атмосфера .....	79
8.3.3. Прямое преобразование тепловой энергии .....	80
8.3.4. Использование энергии приливов и морских течений .....	82
<b>9. ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ (ВЭР) .....</b>	<b>86</b>
9.1. Понятие ВЭР. Источники ВЭР .....	86
9.2. Использование ВЭР для получения электрической и тепловой энергии. Способы использования и преобразования ВЭР .....	86
9.2.1. Использование теплоты отработавших газов .....	86
9.2.2. Использование теплоты низкого потенциала .....	91
9.2.3. Системы аккумулирования энергии .....	93
9.3. Отходы производства и сельскохозяйственные отходы. Способы и возможности их использования в качестве первичных источников для получения электрической и тепловой энергии .....	93
<b>10. БИОТОПЛИВО .....</b>	<b>98</b>
10.1. Классификация биотоплива .....	98
10.2. Производство биомассы для энергетических целей .....	100
10.3. Сжигание биотоплива для получения тепла .....	101
10.4. Спиртовая ферментация (брожение) .....	102
10.5. Получение биогаза путем анаэробного сбраживания .....	103
10.6. Агрохимические способы получения топлива .....	104
<b>11. МЕСТО ГАЗОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....</b>	<b>106</b>
11.1. Опыт Российской Федерации в применении технологий газификации угля в промышленности и народном хозяйстве .....	107
11.2. Мировой опыт в применении технологий газификации угля в промышленности и народном хозяйстве .....	113
11.3. Технология выработки электрической и тепловой энергии с помощью газификации угля .....	121
11.3.1. Тепловые электростанции с технологией газификации угля .....	121

11.3.2. Модульные установки. Оборудование газификации конденсированных топлив (ГКТ) .....	125
12. ЭНЕРГИЯ ВОДОРОДА .....	131
13. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ .....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	140
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	144

Учебное издание

# НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

*Составители*

ГУБИН Владимир Евгеньевич  
МАТВЕЕВА Анастасия Александровна  
ГВОЗДЯКОВ Дмитрий Васильевич  
ЯНКОВСКИЙ Станислав Александрович  
ЛАРИОНОВ Кирилл Борисович  
СЛЮСАРСКИЙ Константин Витальевич  
МАРЫШЕВА Яна Владимировна  
ЦИБУЛЬСКИЙ Святослав Анатольевич  
ЗЕНКОВ Андрей Викторович  
ЛАВРИНЕНКО Сергей Викторович

*Корректурa Е.Л. Тен*

*Компьютерная верстка К.С. Чечельницкая*  
*Дизайн обложки А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 06.11.2019. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать CANON. Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 8,0.  
Заказ 233-19. Тираж 100 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ