

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Казанский государственный  
энергетический университет

Р.С. АБДРАХМАНОВ, С.А. ЗИМНЯКОВ

# НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие  
по курсу  
«Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»

*Допущено Ученым советом КГЭУ  
в качестве учебного пособия для студентов*

Казань 2007

УДК 620  
ББК 31.15  
А13

*Рецензенты:*

доктор географических наук, профессор Казанского государственного  
университета *Ю.П. Переведенцев*;  
доктор технических наук, профессор Казанского государственного  
энергетического университета *В.К. Ильин*

**Абдрахманов Р.С., Зимняков С.А.**

А13        Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб.  
пособие / Р.С. Абдрахманов, С.А. Зимняков. – Казань: Казан. гос.  
энерг. ун-т, 2007. – 96 с.

В учебном пособии рассмотрены научные и технические принципы использования энергии ветра, малых рек, биомассы, Солнца, тепла Земли, морей и океанов в промышленных целях. Рассмотрены методики расчетов эксплуатационных показателей и конкретные примеры по оценке возможностей применения различных видов установок на территории России.

Предназначено для студентов старших курсов специальностей 140101 «Тепловые электрические станции», 140104 «Промышленная теплоэнергетика», 140106 «Энергообеспечение предприятий агропромышленного комплекса», 140205 «Электроэнергетические системы и сети», 140211 «Электроснабжение промышленных предприятий».

УДК 620  
ББК 31.15

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АБ – аккумуляторная батарея
- АИП – автономный источник питания
- АМО – спектр солнечного излучения за пределами атмосферы при нулевой атмосферной массе
- БГГ – биогазогенератор
- БИОЭН – автономный биогазоэнергетический модуль
- БСЭ – батареи солнечных элементов: 1, 2 – плоского типа на основе монокристаллических, поликристаллических и аморфных материалов; 3 – с концентраторами СР
- ВАХ – вольт-амперная характеристика
- ВИЭ – возобновляемые источники энергии
- ВК – ветроколесо
- ВЭ – ветроэнергетика
- ВЭГК – ветроэлектрический генерирующий комплекс
- ВЭС – ветроэлектрическая станция
- ВЭУ – ветроэнергетическая установка
- в.-о. ВЭУ – вертикально-осевая ВЭУ; ВЭУ с вертикальной осью вращения
- ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция
- ГГ – горючий газ
- ГГПК – газогенераторная печь – калорифер
- ГеоТЭС – геотермальная тепловая электрическая станция
- ГТ – газообразное топливо
- ГЭС – гидроэлектростанция
- г.-о. ВЭУ – горизонтально-осевая ВЭУ; ВЭУ с горизонтальной осью вращения
- ДСВ – дни с сильным ветром
- ДТ – древесное топливо
- ЛММ – линия максимальной мощности
- малые ГЭС – гидроэлектростанции общей мощностью до 30 МВт
- микроГЭС – гидроэлектростанции единичной мощностью до 100 кВт
- НЭ – накопитель энергии
- н.э. – нефтяной эквивалент с теплотой сгорания 41,868 ГДж/т
- ОС – окружающая среда
- ПФЭ – полупроводниковая фотоэнергетика
- РПМ – устройство регулировки нагрузки по максимальной мощности
- СР – солнечная радиация
- СЭ – солнечный элемент
- СЭС – солнечная электрическая станция

- ТБО – твердые бытовые отходы  
 т.у.т. – тонна условного топлива  
 ТХГГ – термохимический газогенератор  
 ТЭК – топливно-энергетический комплекс  
 ТЭР – топливно-энергетический ресурс  
 ТЭС – тепловая электростанция  
 у.т. – условное топливо с низшей теплотой сгорания 29,31 ГДж/т (7000 ккал/кг)  
 ФП – фотопреобразователь  
 ФЭС – фотоэлектрическая станция  
 ЭДС – электродвижущая сила, В  
 $A$  – коэффициент идеальности ВАХ  
 $A$  – площадь земной поверхности, км<sup>2</sup>  
 $A$  – суммарная площадь крышки и дна приемника, м<sup>2</sup>  
 $a$  – амплитуда волны, м  
 $a$  – коэффициент торможения  
 $\bar{A}_T$  – средняя годовая выработка электроэнергии ВЭУ, кВт·ч  
 $\bar{A}_M$  – средняя месячная выработка электроэнергии ВЭУ, кВт·ч  
 $A_{пр}$  – площадь освещенной поверхности солнечного нагревателя воды, м<sup>2</sup>  
 $A_0$  – площадь поперечного сечения воздушного потока, м<sup>2</sup>  
 $A_1$  – площадь, ометаемая ветроколесом, м<sup>2</sup>  
 $A_2$  – площадь поперечного сечения воздушного потока за ветроколесом, м<sup>2</sup>  
 $b$  – плотность сухой древесины ствола, кг/м<sup>3</sup>  
 $c$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении и средней температуре для умеренных разностей температур, кДж/(кг·К)  
 $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении  
 $c$  – масштаб изменения функции распределения по оси скоростей  
 $c$  – выход биогаза из сухой биомассы (0,2–0,4 м<sup>3</sup>/кг)  
 $C_N$  – коэффициент мощности, характеризующий эффективность (долю) использования ветроколесом энергии ветрового потока  
 $C_N^{\max}$  – максимальная величина коэффициента мощности  
 $c_r$  – удельная теплоемкость скальной породы  
 $D$  – диаметр внешней стеклянной трубки солнечного приемника с вакуумированным пространством, мм  
 $D$  – диаметр ветроколеса, м  
 $D$  – диаметр рабочего колеса традиционных видов гидротурбин для МГЭС – до 3 м

$d$  – диаметр внутренней стеклянной трубки солнечного приемника с вакуумированным пространством, мм

$\frac{dT_{\text{ж}}}{dt}$  – изменение температуры теплоносителя по времени, К/с

$E$  – возможный энергетический выход биогазогенератора, Вт

$e$  – удельный валовый потенциал энергии абсолютно сухой биомассы, ккал/м<sup>3</sup>

$E_g$  – ширина запрещенной зоны, эВ

$E_V$  – энергия, передаваемая воздуху от поглощающей поверхности в единицу времени

$E_0$  – полное полезное теплосодержание скального грунта от глубины  $Z_1$  до  $Z_2$ , Дж

$F$  – сила, действующая на ось ветроколеса

$F_d$  – сила сопротивления

$F_L$  – «подъемная» сила

$f_m$  – доля метана в биогазе

$f_V \Delta V$  – часть времени года, в течение которого скорость ветра имеет значения, заключенные в интервале от  $V - \Delta V$  до  $V + \Delta V$

$f_V$  – дифференциальная повторяемость скорости ветра конкретной градации

$G$  – поток суммарной солнечной радиации, кВт/м<sup>2</sup>

$G$  – температурный градиент, °С/км

$G_0$  – плотность потока солнечной радиации, приходящего к поверхности фотоэлемента, кВт/м<sup>2</sup>

$H$  – высота от основания башни до оси ротора г.-о. ВЭУ, м

$h$  – постоянная Планка

$H_B$  – теплота сгорания на единицу объема биогаза (удельная объемная теплота сгорания), МДж/м<sup>3</sup>

$H_{\text{фл}}$  – высота флюгера, м

$H_a$  – рабочий (располагаемый) напор, м

$H_f$  – потери напора на трение в каналах и водоводах, м

$H_m$  – удельная теплота сгорания метана (при н.у. 28 МДж/м<sup>3</sup>)

$H_t$  – геометрический напор, м

$I_{\text{кз}}$  – ток короткого замыкания, А

$I_c$  – ток, индуцированный фотонами (световой ток), А

$I_T$  – темновой ток фотодиода, А

$I_{\text{турб}}$  – интенсивность турбулентности

- $K$  – объемный расход воздуха  
 $K$  – показатель экстинкции материалов с прямыми и непрямыми переходами  
 $k$  – крутизна распределения  
 $L$  – безразмерный коэффициент быстроходности гидротурбины  
 $m$  – общая масса сухого сбраживаемого материала  
 $m$  – показатель степенной функции  
 $m$  – оптическая атмосферная масса  
 $\dot{m}$  – массовый расход теплоносителя  
 $m_0$  – масса биомассы в обезвоженном состоянии  
 $m_0$  – масса сухого сбраживаемого материала (на одну единицу КРС)  
 $n$  – количество сопел  
 $N$  – номинальная (расчетная) мощность ВЭУ, кВт  
 $N$  – теоретическая (паспортная) мощность гидротурбины, Вт  
 $N(V)$  – удельная мощность ветрового потока, Вт/м<sup>2</sup>  
 $N(V) \cdot f_V$  – функция распределения энергии ветра, (Вт/м<sup>2</sup>) (м/с)<sup>-1</sup>  
 $\bar{N}$  – средняя развиваемая мощность ветроустановки, кВт  
 $\bar{N}_Г$  – средняя развиваемая мощность ВЭУ за год, кВт  
 $\bar{N}_М$  – средняя развиваемая мощность ВЭУ за месяц, кВт  
 $\Delta N$  – диапазон мощности ВЭУ, кВт  
 $P_\phi$  – фактический тепловой поток, поступающий на приемную поверхность  
 $Q$  – расход воды в заданном сечении, м<sup>3</sup>/с  
 $Q$  – удельная мощность приливного потока  
 $Q_B$  – высшая удельная теплотворная способность, МДж/кг (ккал/кг)  
 $R$  – радиус колеса турбины, м  
 $r$  – радиус лопасти на ободу колеса, м  
 $R_{вн}$  – внутреннее сопротивление источника, Ом  
 $R_n$  – сопротивление внешней нагрузки, Ом  
 $R_{п}$  – последовательное сопротивление, Ом  
 $R_{ш}$  – шунтирующее сопротивление, Ом  
 $R_T$  – полное термическое сопротивление тепловым потерям, К/Вт  
 $t$  – время достижения максимальной средней температуры открытого черного приемника, ч  
 $T$  – период времени (месяц или год), ч  
 $T$  – период морской волны, с  
 $T_a$  – температура окружающей среды, °С  
 $T_{ж}$  – температура теплоносителя в приемнике солнечного излучения, °С  
 $T_{пр}$  – температура приемника солнечного излучения, °С

$T_{\text{ж}}^{\text{max}}$  – максимальная средняя температура теплоносителя в открытом черном приемнике, °С

$T \cdot f_V$  – число часов работы агрегата для скоростей ветра конкретной градации за рассчитываемый период времени (месяц, год), ч

$T_s$  – температура верхних слоев атмосферы, К

$t_r$  – время пребывания сбраживаемой массы в генераторе, сут

$T_0$  – температура земной поверхности, К, °С

$T_1$  – температура входящего в приемник теплоносителя, °С

$T_2$  – температура выходящего из приемника теплоносителя, °С

$T_1$  – минимальная полезная температура для скальной породы, К

$T_2$  – температура на максимальной глубине для скальной породы, К

$U$  – напряжение генератора ветроэнергетической установки, В

$U_{\text{кфп}}$  – напряжение на контактах фотопреобразователя, В

$U_{\text{хх}}$  – напряжение холостого хода, В

$U_j$  – скорость набегающего потока воды, м/с

$U_t$  – скорость движения ковша, м/с

$U_0$  – максимальная скорость приливного потока, м/с

$V$  – скорость ветра, м/с

$\dot{V}$  – объемный расход потока воды, м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>)

$V_{\text{в}}$  – объем получаемого биогаза, м<sup>3</sup>/сут

$V_{\text{Г}}$  – скорость элемента лопасти относительно ветра

$\bar{V}_{\text{Г}}$  – среднегодовая скорость ветра, м/с

$V_{\text{доп}}$  – допустимая скорость ветра ВЭУ по механической прочности, м/с

$\bar{V}_{\text{М}}$  – среднемесячная скорость ветра, м/с

$V_{\text{р}}^{\text{min}}$  – начальная скорость ветра ВЭУ, м/с

$V_{\text{р}}^n$  – номинальная скорость ветра ВЭУ, м/с

$V_{\text{р}}^{\text{max}}$  – максимальная скорость ветра ВЭУ, м/с

$\Delta V$  – интервал скоростей ветра, м/с

$V_{\text{год}}$  – годовое количество древесного топлива, м<sup>3</sup>

$V_{\text{дел.др}}$  – объем деловой древесины (древесина, входящая в состав ликвидной массы, идущая на производство), м<sup>3</sup>

$V_{\text{дел.руб.ух}}$  – объем деловой рубки ухода (часть санитарной рубки ухода, которая может быть использована в производстве), м<sup>3</sup>

$V_{\text{древ.отх.пр}}$  – объем древесных отходов, используемых в производстве, м<sup>3</sup>

$V_{\text{общ.древ.отх}}$  – общий объем древесных отходов, образующийся в результате лесозаготовки, лесопиления и деревообработки (ветви, сучья и т.д.), м<sup>3</sup>

$V_{\text{расч.л}}$  – объем расчетной лесосеки (количество древесины, которое планируется вырубить), м<sup>3</sup>

$V_{\text{руб.ух}}$  – объем рубки ухода (древесина, образующаяся в результате санитарного ухода за лесом (сруб сухостоя)), м<sup>3</sup>

$V_d$  – объем биогазогенератора, м<sup>3</sup>

$\dot{V}_f$  – скорость подачи сбраживаемой массы в биогазогенератор

$V_f$  – объем жидкой массы, заполняющей БГГ, м<sup>3</sup>/сут

$W_a$  – абсолютная влажность, гм<sup>-3</sup>

$W_0$  – относительная влажность, %

$W_V$  – плотность потенциальной энергии, МДж/м<sup>3</sup>

$Z$  – безразмерный коэффициент быстроходности ВЭУ

$\alpha_{\text{пр}}$  – коэффициент поглощения приемной поверхности

$\alpha_\lambda$  – монохроматический коэффициент поглощения

$\varepsilon_\lambda$  – монохроматический коэффициент излучения

$\varepsilon = 0,9$  – излучательная способность приемника

$\eta$  – КПД горелочного устройства

$\eta$  – КПД гидроагрегата

$\eta_{\text{захв}}$  – коэффициент захвата излучения

$\eta_{\text{пр.тепл}}$  – коэффициент теплопередачи в системе приемник-теплоноситель

$\eta_{\text{ср}}$  – средний КПД преобразователей тепловой энергии в электрическую

$\vartheta$  – величина угла между направлением на Солнце и прямой, проходящей через зенит

$\theta$  – средняя допустимая температура  $(T_{\text{пр}} + T_a)/2$ , °С

$\lambda$  – длина волны солнечного излучения, мкм

$\nu$  – частота солнечного излучения, Гц

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>

$\rho_m$  – плотность сухого материала, распределенного в массе, кг/м<sup>3</sup>

$\rho_r$  – плотность сухой скальной породы, кг/м<sup>3</sup>

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана – Больцмана

$\tau$  – постоянная времени, с

$\tau_{\text{покр}}$  – коэффициент пропускания прозрачного покрытия

$\omega$  – угловая скорость, рад/с

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие разработано на кафедре электрических станций КГЭУ на основе обработки и использования материалов, опубликованных в отечественных и зарубежных изданиях, а также собственных разработок кафедры, выполненных в последние годы.

Технология возобновляемых энергоресурсов, основанная на использовании энергии ветра, малых рек, биомассы, Солнца, тепла Земли, волн, приливов и тепловой энергии океанов, приобретает всю большую практическую важность 1) из-за относительной экологической чистоты, обеспечивающей сохранение равновесия общество – среда; 2) из-за безопасности и 3) возможности размещения преобразователей энергии по территории России, что приведет к выравниванию энергопотребления городов и сельских районов с разной плотностью населения.

Для использования ВИЭ необходимо:

- 1) оценить энергоресурсы, ожидаемые эксплуатационные показатели соответствующих установок и преимущества использования ВИЭ;
- 2) уяснить физические основы применения ВИЭ. Многие исследователи и инженеры не имеют основных представлений в области энергетики на ВИЭ;
- 3) создать предпосылки для широкого внедрения технологии возобновляемой энергии;
- 4) подготовить специалистов для конструирования, разработки схем размещения и правильной эксплуатации технических устройств.

Учебная литература по нетрадиционной энергетике весьма малочисленна. В книгах по этой дисциплине отсутствует фактический материал об энергетических ресурсах и наиболее рациональном размещении и проектировании соответствующих установок для конкретных регионов.

В гл. 1 даны определения возобновляемой энергетики, валового, технического и экономического потенциалов ВИЭ, традиционных и нетрадиционных ВИЭ. Рассмотрены перспективы возобновляемой энергетики для решения энергетических, экологических и продовольственных проблем.

В гл. 2 представлены новые тенденции проектирования крупных ветроэлектрических генерирующих комплексов. Рассмотрены физические основы ветроэнергетики, особенности преобразования энергии ветра ВЭУ с постоян-

ной и переменной частотой вращения, способы регулирования мощности современных установок, оптимальные технические характеристики агрегатов с учетом суточного и годового хода скорости ветра и уровень надежности отдельных узлов ВЭУ. Дан анализ методик оценки эксплуатационных параметров ВЭУ при известных характеристиках ветра. В качестве примера рассмотрена энергетическая эффективность средних и крупных установок в северных регионах и на Дальнем Востоке РФ.

В гл. 3 приведены особенности конструкции и работы активных и реактивных гидротурбин, выражения для расчета их параметров и отмечены перспективы развития малой гидроэнергетики на территории РТ. Даны технические характеристики некоторых отечественных микроГЭС.

В гл. 4 отмечены виды биотоплива, описаны процессы анаэробного сбраживания отходов животноводства и получения биогаза, методика расчета энергетического выхода БГГ и конструкции установок для биометаногенерации. Рассмотрены характеристики и способ расчета годового количества ДТ для энергетики, оборудование для термохимической переработки ДТ и эффективность малых ТЭС на древесном топливе в РТ. Особое внимание уделено применению ТБО в энергетике.

В гл. 5 рассмотрены общий подход для получения уравнения теплового баланса, способы оценки основных эксплуатационных параметров приемников СР, солнечное тепловое оборудование для нагрева воды и воздуха.

Гл. 6 посвящена современным проблемам полупроводниковой фотоэнергетики. В ней дан анализ в рамках зонной теории физических процессов в СЭ с гетеропереходом, эквивалентной цепи и ВАХ солнечных элементов. Рассмотрены особенности конструкции модуля и батареи СЭ, а также солнечных электростанций первого и второго поколений.

В гл. 7 рассмотрены внутренняя структура Земли, три класса геотермальных районов, виды ресурсов и запасов геотермальной энергии, свойства сухих горных пород и практические вопросы использования геотермальных ресурсов. Обсуждены вопросы использования тепловой энергии океана, энергии приливов и волн.

В гл. 8 рассмотрены методики расчетов и конкретные примеры по оценке возможностей реализации различных видов установок на территории РФ.

Содержание лабораторных работ приведено в [17].

Пособие [1] содержит программу дисциплины, общие рекомендации по работе над курсом, методические указания и контрольные задания.

## Глава 1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НЕТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

### 1.1. Основные определения и терминология [27]

Задачи удовлетворения потребностей населения и промышленности в электрической и тепловой энергии в районах, удаленных от централизованных энергетических сетей, приводят к необходимости развития возобновляемой энергетики (нетрадиционной и малой). Это обусловлено ограниченностью запасов ископаемых видов топлива и требованиями обеспечения экологической безопасности.

**Возобновляемая энергетика** – область хозяйства, науки и техники, охватывающая производство, передачу и преобразование, накопление и потребление электрической, тепловой и механической энергии, получаемой за счет использования **возобновляемых источников энергии (ВИЭ)**: Солнца, ветра, тепла Земли, биомассы, малых рек, морей и океанов, низкопотенциального тепла, а также новых ВИЭ и новых альтернативных экологически чистых видов топлива.

**ВИЭ (неистощаемые)** – источники энергии, образующиеся на основе постоянно существующих или периодически возникающих процессов в природе, а также жизненном цикле растительного и животного мира и жизнедеятельности человеческого общества.

Принято условно разделять ВИЭ на две группы:

– **традиционные:** гидравлическая энергия, преобразуемая в используемый вид энергии ГЭС мощностью более 30 МВт; энергия биомассы, используемая для получения тепла традиционными способами сжигания (дрова, торф); геотермальная энергия;

– **нетрадиционные:** солнечная, ветровая, энергия морских волн, течений, приливов и океана, гидравлическая энергия, преобразуемая в используемый вид энергии малыми и микроГЭС, энергия биомассы, не используемая для получения тепла традиционными методами, низкопотенциальная тепловая энергия и другие «новые» виды возобновляемой энергии.

**Невозобновляемые (истощаемые) источники энергии** – природные запасы вещества и материалов, которые могут быть использованы человеком для производства энергии (ядерное топливо, уголь, нефть, природный газ и др.).

**Ресурс (потенциал) ВИЭ** – объем энергии, заключенной или извлекаемой при определенных условиях из ВИЭ в течение года.

**Валовый потенциал ВИЭ** – средний годовой объем энергии, содержащийся в данном виде ВИЭ при полном ее превращении в полезно используемую энергию.

**Технический потенциал ВИЭ** – часть валового потенциала, преобразование которого в полезно используемую энергию возможно при данном уровне развития технических средств, при соблюдении требований по охране окружающей среды (ОС).

**Экономический потенциал ВИЭ** – часть технического потенциала, преобразование которого в полезно используемую энергию экономически целесообразно при данном уровне цен на ископаемое топливо, тепловую и электрическую энергию, оборудование, материалы и транспортные услуги, оплату труда и др.

**Установки возобновляемой энергетики** – взаимосвязанный комплекс технологического оборудования по преобразованию возобновляемой энергии в полезно используемый вид: электрическую, тепловую, механическую энергию или их различные сочетания.

## 1.2. Перспективы возобновляемой энергетики

Использование ВЭИ в настоящее время может улучшить экономическую обстановку в мире. Для уменьшения вреда ОС от традиционной энергетики необходимо затратить средства на дополнительное технологическое оборудование. Поэтому вопросы развития энергетики должны рассматриваться с единых экономико-социально-экологических позиций.

ВЭИ играют значительную роль в решении трех глобальных проблем, стоящих перед человечеством (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Роль ВИЭ в решении трех глобальных проблем человечества

Вид ресурсов или установок	Энергетика	Экология	Продовольствие
Ветроустановки	+	+	+ <sup>1</sup>
Малые и микроГЭС	+	+	+ <sup>2</sup>
Солнечные тепловые установки	+	+	+ <sup>3</sup>
Солнечные фотоэлектрические установки	+	+	+ <sup>4</sup>
Геотермальные электрические станции	+	+/-	0
Геотермальные тепловые установки	+	+/-	+ <sup>5</sup>
Биомасса. Сжигание твердых бытовых отходов	+	+/-	0

Вид ресурсов или установок	Энергетика	Экология	Продовольствие
Биомасса. Сжигание сельскохозяйственных отходов, отходов лесозаготовок и лесопереработок	+	+/-	+ <sup>6</sup>
Биомасса. Биоэнергетическая переработка отходов	+	+	+ <sup>7</sup>
Биомасса. Газификация	+	+	0
Биомасса. Получение жидкого топлива	+	+	+ <sup>8</sup>
Установки по утилизации низкопотенциального тепла	+	+	0

Примечания. + (плюс) – положительное влияние, – (минус) – отрицательное влияние, 0 – отсутствие влияния.

<sup>1</sup> Водоподъемные установки на пастбищах и в удаленных населенных пунктах.

<sup>2</sup> Орошение земель на базе малых водохранилищ, водоподъемные устройства таранного типа.

<sup>3</sup> Установки для сушки сена, зерна, сельскохозяйственных продуктов, фруктов.

<sup>4</sup> Водоподъемные системы, питание охранных устройств на пастбищах.

<sup>5</sup> Обогрев теплиц геотермальными водами.

<sup>6</sup> Использование золы в качестве удобрения.

<sup>7</sup> Получение экологически чистых удобрений в результате сбраживания отходов.

<sup>8</sup> Получение дизельного топлива из семян рапса – самообеспечение сельского хозяйства дизельным топливом.

### Контрольные вопросы

1. Каковы характеристики возобновляемой энергии, которые отличают её от энергии, связанной с использованием органического топлива или ядерного горючего?

2. Что называют валовым, техническим и экономическим потенциалом ВИЭ?

3. Что обуславливает перспективность развития ветроэнергетики и малой гидроэнергетики на территории России?

4. Эксплуатация каких технических систем нетрадиционной энергетики основана на преобразовании солнечной энергии?

5. Объясните процесс накопления энергии в биомассе и способы её использования.

6. Каковы основы использования тепла недр Земли?

7. Почему развитие технологии возобновляемых энергоресурсов является важным с энергетической, экологической и экономической точки зрения?

8. Какие физические процессы лежат в основе использования ВИЭ?

9. Назовите оптимальные направления развития нетрадиционной энергетики в северных и южных регионах, на Дальнем Востоке и на участках России с умеренным климатом.

## Глава 2. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

### 2.1. Введение

В последнее время усилился интерес потребителей и промышленности к ветроэнергетике (ВЭ). Предполагается, что в XXI веке она займет третье место среди других видов первичной энергии. Новые тенденции развития ВЭ обусловлены: 1) положительным опытом эксплуатации горизонтально-осевых (г.-о.) ветроэнергетических установок (ВЭУ) в 1980-е годы; 2) общей тенденцией снижения стоимости электроэнергии ВЭУ до  $\leq 4$  цент/кВт·ч, что делает ВЭУ способными конкурировать с традиционными источниками энергии; 3) разработкой технологий применения крупных ветроэлектрических генерирующих комплексов для работы в энергосистемах; 4) снижением стоимости г.-о. установок за счет уменьшения веса лопастей и башни ВЭУ. ВЭУ с высотой башни  $H = 40\text{--}124$  м используют значительную скорость ветра  $V$ . На высокие башни меньше влияет изменение профиля скорости ветра в приземном слое атмосферы; 5) разработкой и конструированием ВЭУ различных классов, использующих для выработки электроэнергии  $\bar{A}$ , кВт·ч, слабые скорости ветра  $\bar{V} = 2,0\text{--}3,0$  м/с; 6) размещением многоагрегатных ветроэлектрических станций (ВЭС) в прибрежных водах морей и океанов. В условиях более высокой  $\bar{V}$  величина  $\bar{A}$  в этом случае повышается до 30 %. Для агрегатов оптимальная величина  $H \geq 70$  м при установке фундамента на глубине до 10–20 м; 7) определенными преимуществами ВЭ для сохранения окружающей среды (ОС); 8) благоприятной оценкой ветроэнергетического потенциала северных регионов и Дальнего Востока России (средняя годовая скорость ветра  $\bar{V}_Г > 5,0$  м/с на высоте флюгера  $H_{фл} = 10$  м над подстилающей поверхностью).

Современные ВЭУ должны отличаться износоустойчивостью, простотой конструкции, относительно большим сроком эксплуатации (несколько тысяч часов в год) без капитального ремонта. В районах с благоприятными ветровыми условиями среднегодовая выработка  $\bar{A}_Г$  составляет 25–33 % его максимального проектного значения. Срок службы ВЭУ не менее 15–20 лет. ВЭУ должны быть обеспечены защитой от разрушения из-за сильной флуктуации скорости ветра. Для лопастей также существенны переменные гравитационные нагрузки ( $\sim 10^7$  циклов за 20 лет эксплуатации).

## 2.2. Классификация ВЭУ

ВЭУ классифицируются по геометрии ветроколеса (ВК) и его положению относительно направления ветра.

При взаимодействии потока с лопастью возникают: а) сила сопротивления  $F_d \parallel V_G$ ; б) «подъемная» сила  $F_L \perp F_d$ : сила  $F_L$  не направлена вверх; в) завихрение потока, обтекающего лопасти; г) турбулизация потока и д) препятствие для набегающего потока, характеризуемое геометрическим заполнением. Этот параметр равен отношению площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку, к ометаемой ими площади. Для ВЭУ геометрическое заполнение ВК определяется числом лопастей.

Основные классифицирующие признаки ВЭУ следующие.

1. В г.-о. и в.-о. ВЭУ ось вращения ВК является параллельной или перпендикулярной воздушному потоку соответственно.

2. Для ветроустановок вращающей силой является сила сопротивления (ВЭУ I) или «подъемная» сила (ВЭУ II). Для ВЭУ I ветроколесо вращается с линейной скоростью, меньшей скорости ветра. Для ВЭУ II линейная скорость концов лопастей существенно больше скорости ветра.

3. Для ВЭУ с большим заполнением ВК значительная мощность достигается при относительно слабом ветре и максимум мощности получается при небольших оборотах колеса. Максимальная мощность ВЭУ с малым заполнением достигается при больших оборотах. Такие ВЭУ используются в качестве электрогенераторов, где требуется высокая частота вращения.

4. ВЭУ для выполнения механической работы называют ветряной мельницей или турбиной. Совокупность турбины и электрогенератора называют ветроэлектрогенераторами или ВЭУ с преобразованием энергии.

5. Подключенные к электросистеме ВЭУ характеризуются постоянной частотой вращения из-за эффекта автосинхронизации. ВЭУ с переменной частотой вращения по сравнению с ними более эффективно используют энергию ветра.

6. Существуют ВЭУ с жестким соединением колеса с электрогенератором, частично развязанной схемой соединения ветроколесо-генератор и промежуточным преобразователем энергии. Наличие буфера в третьем типе ВЭУ позволяет уменьшить влияние флуктуации частоты вращения ВК и более эффективно использовать энергию ветра и мощность электрогенератора.

**Ветроколесо с горизонтальной осью.** В г.-о. ВЭУ лопасти, находящиеся в вертикальной плоскости, вращают горизонтальный вал. Вращающей силой для ВК в основном является «подъемная» сила. Относительно ветра колесо ВЭУ может находиться перед опорной башней или за ней. Для отсле-

живания изменения направления ветра в ВЭУ мощностью  $N \geq 50$  кВт применяются электрические серводвигатели.

Изготовление для ВЭУ прочных лопастей требуемого профиля связано с решением достаточно сложных технологических задач. В частности, они изготавливаются либо из композитов, включающих стекловолокно, либо путем прессования порошкообразного алюминия. Их стоимость составляет 20–30 % полной стоимости ВЭУ. Поэтому обычно используются двухлопастные колеса и реже трехлопастные ветроколеса, хотя последние отличаются очень плавным ходом. Электрогенератор и соединяющий его с ветроколесом редуктор обычно находятся наверху в поворотной головке ВЭУ.

ВЭУ мощностью 0,1–80 кВт применяются для энергоснабжения автономных объектов, удаленных от линий электропередачи. Они предназначены для подъема, нагрева и опреснения воды, орошения, мелиорации, катодной защиты стальных трубопроводов, освещения и отопления помещений.

Ведутся фундаментальные исследования и конструируются г.-о. ВЭУ среднего класса мощностью 225–400 кВт и крупные установки с  $N = 1,5–4,5$  МВт. С целью снижения стоимости вырабатываемой электроэнергии группы ВЭУ мощностью  $\geq 100$  кВт используются для работы в энергосистемах. В настоящее время ВЭС являются в основном дублирующими станциями. Подключение крупных ВЭУ к электросистеме позволяет уменьшить затраты на все виды строительных работ, создание линий электропередачи, распределительных устройств, оборудования защиты и других узлов ВЭУ. Высокая эффективность работы крупных г.-о. ВЭУ обеспечивается ЭВМ, гидравлическими системами регулирования положения лопастей, выбором профиля лопасти и другим оборудованием. Диаметр колеса ВЭУ достигает  $\leq 124$  м. Лопастей ВЭУ мощностью  $> 2$  МВт и пригодные для работы в суровых климатических условиях России должны иметь качественно новую конструкцию. В настоящее время оптимальными являются ВЭУ мощностью  $\geq 2$  МВт с  $D \leq 124$  м.

**ВЭУ с вертикальной осью вращения.** Конструкции в.-о. ВЭУ перспективны для выработки больших мощностей электроэнергии. В 1970-х годах эту идею развили в национальной лаборатории Sandia (США). Была создана простая конструкция воздушной турбины, способная выдерживать сильные порывы ветра. Из-за геометрических особенностей конструкции ВЭУ при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Такая схема позволяет путем удлинения вала установить редуктор с генераторами внизу башни. Это облегчает обслуживание и ремонт узлов установки. Вертикально-осевые ВЭУ не имеют движущихся частей для поворота по направлению ветра. Их лопасти могут быть изготовлены прессованием алюминия под

давлением. Раскручивание в начальный момент воздушной турбины с вертикальной осью вращения осуществляется дополнительным генератором, питаемым от местной электросети.

Наиболее распространенные типы в.-о. ВЭУ следующие: чашечный ротор (анемометр), ротор Савониуса, ротор Масгрува и ротор Эванса. Наконец, в роторе Дарье вращающий момент создается подъемной силой, возникающей на двух или трех тонких изогнутых несущих поверхностях аэродинамического профиля. В тот момент, когда лопасть с большой скоростью пересекает воздушный поток, сила  $F_L$  является максимальной. Ротор Дарье применяется в ВЭУ и запускается генератором, работающим в режиме двигателя.

Основу развития ветроэнергетики представляют:

- 1) корректные метеоданные для предполагаемых районов размещения ВЭУ или крупных ВЭГК и на их основе целенаправленный выбор агрегатов с оптимальными техническими характеристиками;
- 2) рост единичной мощности ВЭУ ( $N \geq 2$  МВт) для системной ВЭ;
- 3) создание и совершенствование в.-о. ВЭУ большой мощности;
- 4) разработка ВЭУ мегаваттного класса для установки в прибрежных водах глубиной до 20 м;
- 5) строительство ветросолнечных станций и комплексов ВЭУ – дизельгенератор (ДГ) – аккумуляторная батарея (АБ).

ВЭУ также классифицируются по мощности. К малому классу относятся ВЭУ с  $N \leq 50$  кВт, среднему – 50–500 кВт и крупному – 500–4500 кВт.

### 2.3. Климатические ресурсы ветра

Изучение климатических ресурсов ветра включает следующие вопросы:

1. Определение преобладающего направления ветра г.-о. ВЭУ. Анализ средних скоростей ветра за месяцы I–XII, сезоны (зима, весна, лето, осень) и год, вычисленных из рядов наблюдений относительно большой длительности; величин  $\bar{V}_{I-XII}$ ,  $\bar{V}_{з.в.л.о}$  и  $\bar{V}_Г$  на основе анализа межгодовых колебаний скорости ветра. Рассмотренные скорости ветра соответствуют высоте флюгера  $H_{фл} = 10$  м.

2. Статистический анализ результатов измерений скорости ветра и на их основе ветроэнергетические расчеты в условиях конкретной местности; уяснение распределения скорости ветра по грациям; анализ повторяемости скоростей ветра  $f_V$ , полученных экспериментально и с использованием распределения Вейбулла и характера распределения энергии ветра для рабочего диапазона скоростей  $\Delta V = V_p^{\min} - V_p^{\max}$  ВЭУ.

3. Анализ влияния на прочность и надежность конструкции ВЭУ ускорения ветра в порыве с  $\Delta V^{\max}$ , интенсивности турбулентности  $I_{\text{турб}}$  и экстремального отложения гололеда на узлах ветроустановки и опорной башне.

Расчет зависимости коэффициента использования от  $\bar{V}$  для современных крупных ветроустановок с  $V_p^n = 12$  и  $16$  м/с показал, что для таких ветроагрегатов из-за эффекта турбулентности наблюдаются непродолжительные изменения направления, которые необходимо учитывать при разработке конструкций и схем размещения ВЭУ.

Скорость ветра существенно влияет на энергию, приходящуюся на единицу площади  $\bar{N}/A$ . Например, при плотности воздуха  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup> и скоростях ветра 5, 10, 15 и 20 м/с величины  $\bar{N}/A$  соответственно равны 80, 610, 2070 и 4900 Вт/м<sup>2</sup>.

На участках территории с умеренными и сильными ветрами энергетически эффективно применять современные крупные ВЭУ с большой высотой опоры. Поэтому количественные данные об изменении скорости ветра с ростом высоты являются практически важными при ветроэнергетических расчетах, проектировании ВЭУ и оценке ожидаемой производительности различных типов ВЭУ для конкретной местности.

Логарифмический профиль (логарифмический закон) скорости ветра описывается с помощью следующего выражения:

$$V(z) = \frac{V^*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right), \quad (2.1)$$

где  $V^*$  – характерная скорость;  $k$  – постоянная Кармана, равная 0,4;  $z$  – высота до оси ветроколеса и  $z_0$  – высота шероховатости поверхности. Для разных поверхностей рельефа – лед, заснеженная поверхность или засеянные поля величины  $z_0$  равны 0,01, 3,00 и 50,00 мм соответственно.

В качестве простой модели вертикального профиля скорости ветра используется закон степенной зависимости. Величина показателя степенной функции  $m$  зависит от высоты, скорости ветра, времени суток и года, типа рельефа, температуры и др. Плотность ветровой энергии на больших высотах существенно зависит от величины  $m$ .

На основе анализа климатических данных для конкретного участка территории осуществляется выбор оптимальных величин начальной, номинальной и максимальной скоростей ветра ветроагрегата  $V_p^{\min}$ ,  $V_p^n$  и  $V_p^{\max}$  соответственно, расчетной (номинальной) мощности  $N$ , диаметра ветроколеса  $D$  и высоты опорной башни  $H$  ветроэнергетической установки.

## 2.4. Преобразование энергии ветра

Рассмотрим принцип действия ВЭУ. Считаем скорость потока воздуха  $V_0$  и плотность воздуха  $\rho$  постоянными во времени в любом поперечном сечении потока. Без учета турбулентности кинетическая энергия ветрового потока, проходящего в единицу времени через ометаемую площадь ветроколесом  $A_1$ , равна

$$N_0 = \frac{1}{2} (\rho A_1 V_0) V_0^2 = \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^3. \quad (2.2)$$

ВК, ометающее площадь  $A_1$ , развивает мощность

$$N = \frac{1}{2} \rho V_0^3 A_1 C_N \quad [\text{Н}\cdot\text{м}/\text{с или Вт}], \quad (2.3)$$

где  $C_N$  – коэффициент мощности, характеризующий эффективность (долю) использования ВК энергии ветрового потока. Этот параметр зависит от конструкции ВК и скорости ветра. Среднегодовая мощность для единицы площади ВК оценивается для стандартной скорости ветра  $V_0 = 12$  м/с и мощности, снимаемой с  $1 \text{ м}^2$  ометаемой площади, порядка 300 Вт при величинах  $C_N = 0,35\text{--}0,45$ .

## 2.5. Физические основы ветроэнергетики

В модели взаимодействия воздушного потока с ВК выделим три поперечных сечения. В сечении  $A_0$  наблюдается скорость невозмущенного потока ветра  $V_0$ . Сечению  $A_1$  соответствует параметр  $V_1$ . За ветроколесом выделим сечение  $A_2$  со скоростью ветра  $V_2$ .

Линейная модель преобразования энергии ветра ВЭУ имеет следующие особенности.

1. Ветроколесо рассматривается как тонкий диск.
2. Линии тока проходят колесо без разрыва.
3. Воздушный поток при взаимодействии с ВК отдает часть энергии. При этом давление в потоке и его импульс уменьшаются.
4. Величина коэффициента торможения  $a$  изменяется в диапазоне  $0 < a < 1/2$ .

Действующая на ВК сила  $F$  равна

$$F = \dot{m} V_0 - \dot{m} V_2. \quad (2.4)$$

Мощность, развиваемая этой силой, или мощность ВК

$$N = F V_1 = \dot{m} (V_0 - V_2) V_1. \quad (2.5)$$

Мощность  $N$  можно интерпретировать как энергию, теряемую в единицу времени при взаимодействии ветрового потока с ВК, которая равна

$$N_W = \frac{1}{2} \dot{m} (V_0^2 - V_2^2). \quad (2.6)$$

Приравнявая (2.5) и (2.6), получаем:

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2}. \quad (2.7)$$

В линейной теории величина  $V_1$  не может быть меньше половины скорости набегающего потока.

После замены  $\dot{m}$  на  $\rho A_1 V_1$  и  $V_2$  на  $(2V_1 - V_0)$  выражение (2.5) принимает вид

$$N = 2 \rho A_1 V_1^2 (V_0 - V_1). \quad (2.8)$$

Относительное уменьшение в ВК скорости  $V_0$  определим через коэффициент торможения потока  $a$  по формуле

$$a = (V_0 - V_1) / V_0. \quad (2.9)$$

С учетом (2.7)

$$a = (V_0 - V_2) / 2V_0. \quad (2.10)$$

Из (2.9) также следует, что

$$V_1 = (1 - a) V_0. \quad (2.11)$$

Заменяя в (2.8)  $V_1$  на (2.11), имеем

$$N = \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^3 [4a (1 - a)^2]. \quad (2.12)$$

Анализ (2.2) и (2.12) позволяет выявить связь мощности ВЭУ и мощности набегающего ветрового потока:

$$N = C_N \cdot N_0, \quad (2.13)$$

где

$$C_N = 4a (1 - a)^2.$$

В рамках линейной модели  $a = 1/3$  и  $C_N^{\max} = 16/27 = 0,59$ .

Следовательно, для идеального ВК с сечением  $A_1$  можно использовать лишь немногим более половины энергии невозмущенного потока. Действительная выходная мощность оказывается ниже значения  $C_N^{\max}$  Жуковского – Бетца. Это связано с трудностями оптимизации профиля и угла установки лопастей ВЭУ, потерями, связанными с турбулентностью, трением и преобразованием кинетической энергии в механическую. В лучших промышленных ВЭУ величина  $C_N$  достигает 0,40–0,45. Величина  $C_N^{\max} = 0,59$  соответствует КПД = 100 %. Поэтому КПД агрегатов с  $C_N = 0,4$  равен 68 %.

Для сечения  $A_2 > A_1$ , где поток имеет цилиндрическую форму,  $C_N^{\max} = 0,687$ . При сравнении удельных характеристик разных типов ВЭУ необходимо учитывать особенности определения  $C_N$ .

## 2.6. Использование установленной мощности

Установленная мощность ветроустановок, подключенных к сетям энергосистем, в мире на конец 1996 г. превысила 6000 МВт. Установленная мощность ВЭУ в мире к 2006 г. должна была увеличиться почти в 6 раз по сравнению с 1996 г.

Некоторые страны идут по пути создания крупных ВЭС, их еще называют ветроэлектрическими генерирующими комплексами и «ветровыми фермами». Например, в пункте (п.) Алтамонт (США, штат Калифорния) мощность ВЭС составила 698 МВт. Напротив, в Дании около 60 % установленной мощности сосредоточено в руках частных собственников, имеющих 1–2 ВЭУ.

Рассмотрим соотношение между мощностью горизонтально-осевых ВЭУ и размерами основных ее элементов. В диапазоне мощности ВЭУ  $\Delta N = 55–100$  кВт диаметр ротора изменяется от 15 до 20 м, а высота башни составляет  $H = 18–30$  м. Для  $\Delta N = 100–300$  кВт диаметр ротора  $D = 20–35$  м и  $H = 22–35$  м. Для агрегатов мощностью 300–1000 кВт величины  $D = 35–80$  м и  $H = 35–80$  м. Для ВЭУ мегаватного класса  $D \approx H$ .

## 2.7. Эксплуатационные показатели ВЭУ

На рис. 2.1, а показана зависимость  $C_N(N)$  для агрегата с постоянной частотой вращения.

На рис. 2.1, б штрихованная и сплошная линии соответствуют ВЭУ с переменной и постоянной частотой вращения. Заштрихованная область соответствует потере мощности для случая  $Z \neq \text{const}$ .

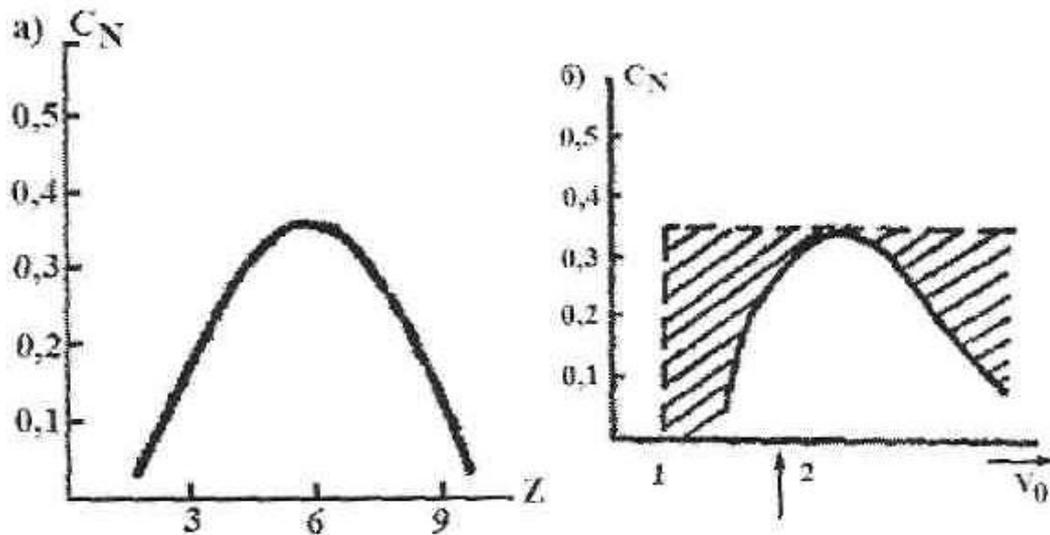


Рис. 2.1. Зависимость  $C_N$  от коэффициента быстроходности  $Z$  ВЭУ с постоянной частотой вращения (а) и от скорости ветра  $V_0$  при постоянной быстроходности (б): 1 – включение, 2 –  $V_p^n$

Эксплуатационные показатели ВЭУ (средняя выработка электроэнергии,  $\bar{A}$ , кВт·ч, развиваемая мощность  $\bar{N}$ , кВт, и суммарное время работы  $T$ , ч, в рабочем диапазоне скоростей ВЭУ за рассматриваемый период времени) можно оценить с помощью известных климатических ресурсов ветра в районах размещения ВЭУ. Метеоданные позволяют определить преобладающее направление ветра для г.-о. ВЭУ, выполнить анализ средних месячных, сезонных и годовых скоростей ветра, вычисленные из рядов наблюдений относительно большой длительности с учетом межгодовых колебаний скорости ветра, оценить повторяемость скорости ветра  $f_V$  с использованием экспериментальных и теоретических данных.

Информацию об эксплуатационных показателях ВЭУ также можно получить из анализа коэффициента использования установленной мощности и удельной выработки (для ветроустановок – это выработанная энергия, отнесенная к площади ометаемой поверхности) ветроустановок. Для лучших ВЭУ коэффициент использования равен 0,4–0,5. Это соответствует коэффициенту использования мощности ГЭС.

Отметим принципиальную разницу между ГЭС и ВЭС. Генераторы ГЭС используются для покрытия пиков графиков нагрузки. Генераторы ВЭС должны работать в базе графика нагрузки.

Второй эксплуатационный показатель – удельная выработка электроэнергии на единицу площади ометаемой поверхности в год. Например, для ВЭУ с  $N = 1000–2000$  кВт величины  $A_{уд} = 1023–1438$  кВт/м<sup>2</sup>.

Условиям работы ВЭУ наилучшим образом отвечают асинхронные генераторы. Диапазон напряжений генераторов составляет 320–690 В. Наиболее применяемая скорость вращения генераторов составляет 1500 об/мин.

Существует два разных способа регулирования мощности установок. Первый – регулирование мощности путём изменения угла между лопастью и набегающим потоком воздуха, так называемым «углом атаки». Эффективность «пич-регулирования» определяется надёжностью гидравлической и механической систем поворота лопастей. Во втором способе профиль лопасти выбирается так, чтобы при скорости ветра выше расчетной  $\bar{V} > V_p^n$  мощность была бы равной номинальной. Отметим, что при определенной для каждого участка скорости ветра наступает срыв потока. Это так называемое «столл-регулирование».

## 2.8. Уровень надёжности ветроагрегатов

Согласно литературным данным, если брать ветровую турбину в целом, самым ненадежным элементом является ротор (26 %), далее башня (21,1 %), трансмиссия (21,1 %), электрическая часть и система управления (20 %) и т. д. ВЭС вполне конкурентоспособны с другими видами ЭС на возобновляемых и истощаемых ресурсах. Так, стоимость электроэнергии от ВЭС достигла в Дании 4 цент/кВт·ч. Это является одним из самых низких значений.

Анализ климатических ресурсов ветра северных регионов и Дальнего Востока России свидетельствует об эффективности их использования в ветроэнергетике. Следует отметить, что анализ особенностей ветрового режима конкретных регионов (например, Приморского края и Сахалинской обл.) позволяет оптимизировать поиск лучших возможностей использования ветровой энергии и техники.

В Приморском крае наибольшие средние годовые скорости ветра наблюдаются в горах на высоте 1200 м – 9,5 м/с, на побережье и открытых мысах (п. Сосуново –  $\bar{V}_T = 6,9$  м/с, Поворотный – 6,7). Пункты Сосуново, Воробей, Владивосток, Пидан и Аскольд отличаются ярко выраженным годовым ходом скорости ветра ( $\bar{V}_3 : \bar{V}_I = 1,4–2,1$ ). Для п. Поворотный  $\bar{V}_3 : \bar{V}_I = 1,1$  и относительно большие скорости были отмечены в июне и июле ( $\bar{V}_M = 7,8–8,0$  м/с). Ветроэнергетические расчеты показали, что в условиях Приморского края на открытых возвышенностях и на побережье Японского моря целесообразно применять современные ВЭУ различных классов с  $V_p^n = 14,5–17,0$  м/с для снижения стоимости вырабатываемой электроэнер-

гии. ВЭГК необходимо использовать вблизи портов, достаточно больших населенных пунктов и размещать по территории края с целью выравнивания обеспеченности энергией различных районов.

Ветровой режим Сахалинской обл. обусловлен меридиональной вытянутостью острова (о.) Сахалин, большой протяженностью Курильской островной гряды, обширными водными пространствами и наличием холодного и теплого течений. Скорость ветра меняется по территории и во времени. В большинстве районов сильные ветры приходятся на январь, февраль, ноябрь и декабрь. Скорости ветра в месяцы I–III, X–XII или в холодное полугодие  $\bar{V}_{\text{ХП}} = 8,7\text{--}12,5$  м/с, величины  $\bar{V}_{\Gamma} = 7,3\text{--}10,4$  м/с и большая повторяемость градации 10–11 м/с наблюдаются на мысах (м.) Сахалина и Курильских островах. Годовой ход скорости ветра ярко выражен на м. Крильон, Елизавета, Терпения, Васильева и в п. Уруп, Матуа ( $\bar{V}_3:\bar{V}_{\text{Л}} = 1,5\text{--}2,2$ ). Величины  $\bar{V}_3:\bar{V}_{\text{Л}} = 2,0\text{--}2,6$  наблюдаются в п. Холмск, Малокурильское и Курильск с  $\bar{V}_{\Gamma} = 5,5\text{--}5,9$  м/с. Для Сахалинской обл. число дней с сильным ветром (ДСВ) варьируется от 4 до 185 дней в году.

На отдельных участках рассматриваемых территорий возможны скорости ветра  $\geq 40$  м/с. Оптимальными для работы в этих условиях являются ВЭУ с малым временем отключения и максимальной скоростью ветра по условиям прочности  $V^{\text{max}} = 50\text{--}60$  м/с.

Курильская островная гряда является высокосейсмической областью. На островах с высокими и экстремальными ветрами целесообразно использовать ВЭУ с особо прочными конструкциями узлов и высотой опоры  $H \leq 50$  м. Данные о ветровых режимах и нагрузках также представляют практический интерес при проектировании, строительстве и эксплуатации воздушных линий ВЭС – потребитель.

Оказалось, что в п. Сосуново, Воробей, Владивосток, Пидан, Аскольд, м. Поворотный, Елизаветы, п. Оха, Шумшу, м. Васильева, Терпения, п. Матуа, Симушир, Монерон, Уруп, м. Крильон и м. Ван-дер-Линда с  $\bar{V}_{\Gamma} \geq 6,5$  м/с достаточно высокая эффективность ВЭГК может быть получена при эксплуатации крупных ветроагрегатов с  $V_{\text{p}}^{\text{min}} = 2,0\text{--}3,0$ ,  $V_{\text{p}}^{\text{n}} = 14,5\text{--}17,0$ ,  $V_{\text{p}}^{\text{max}} = 25,0$  и  $V^{\text{max}} = 50\text{--}60,0$  м/с и  $H \geq 40$  м. В п. Холмск, Курильск, Южно-Курильск, Малокурильское и Зеленовск с  $V^{\text{max}} \leq 6,1$  м/с необходимо использовать ВЭУ с  $V_{\text{p}}^{\text{min}} = 2,0\text{--}3,0$  м/с,  $V_{\text{p}}^{\text{n}} = 11,0\text{--}13,0$  м/с и большой высотой башни. В пунктах со средними годовыми скоростями ветра 5,6–6,1 м/с и ярко выраженными годовым и суточным изменением скорости ветра оптимальной

для электроснабжения автономного потребителя в течение года является ветродизельная система с накопителями электрической энергии.

## 2.9. Анализ методик оценки эксплуатационных параметров ВЭУ при известных характеристиках ветра

Покажем, что применение двух методик ветроэнергетических расчётов и оценки технико-экономических показателей ВЭУ, а также сравнительный анализ полученных данных даёт возможность оптимизировать для аналитической функции Вейбулла величину параметра  $k$ , характеризующего крутизну распределения скорости ветра.

Ветроэнергетические расчеты и оценки эксплуатационных показателей ветроагрегатов были выполнены при известных средних скоростях ветра за месяцы I–XII ( $\bar{V}_{I-XII}$ ), зимний, весенний, летний и осенний сезоны ( $\bar{V}_{з,в,л,о}$ ) и год ( $\bar{V}_Г$ ). В первой методике используются аналитические функции распределения скорости ветра. В этом случае среднюю скорость ветра  $\bar{V}$  за данный период времени представляют в виде последовательности скоростей  $V = 0, 1, 2, 3, 4 \dots \geq 25$  м/с (табл. 2.1, первая колонка). Причём появление каждой из них определяется дифференциальной вероятностью  $f_V$ . Для января ( $\bar{V}_I = 5,6$  м/с) величины  $f_V$  получены с использованием распределения Вейбулла при  $k = 1,8$  (табл. 2.1, третья колонка). Двухпараметрическое распределение Вейбулла описывается следующими выражениями:

$$F(V) = e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}, \quad (2.14)$$

$$f(V) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}, \quad (2.15)$$

где параметр  $c$ , м/с, характеризует масштаб изменения функции распределения по оси скоростей. При  $k = 2$  выражение (2.15) можно свести к однопараметрическому распределению Релея:

$$f(V) = \frac{2 \cdot V}{c^2} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^2}. \quad (2.16)$$

При ветроэнергетических расчётах используют значение  $c$ , близкое к средней скорости ветра на высоте  $H$ , и величины  $k = 1,6, 1,8, 2,0$  и  $2,4$ . Для современных ВЭУ имеются данные о развиваемой мощности агрегата  $N$ , кВт, в рабочем диапазоне скоростей ветра  $V_p^{\min} \leq V \leq V_p^{\max}$  и величины

$V_p^{\min} = 2,0-4,0$ ,  $V_p^{\max} = 23,0-28,0$  м/с. Во второй колонке приведены известные из литературы данные фирм-разработчиков о развиваемой мощности установки  $N$ , кВт, при различных  $V$ , м/с; в четвёртой – время работы агрегата  $f_V \cdot T$  для конкретных  $V$ . Отметим, что в ряду месяцев I–XII величины  $T_{I-XII} = 744, 672, 744, 720, 744, 720, 744, 744, 720, 744, 720, 744$ , в зимний, весенний, летний и осенний сезоны  $T_{Т,В,Л,О} = 2160, 2208, 2208, 2184$ ; в холодное и теплое полугодие  $T_{I-III, X-XII} = 4368$  и  $T_{IV-IX} = 4392$  и в году 8760 ч соответственно. В условиях данного пункта в январе и июле выработки электроэнергии установки соответственно составляют  $\bar{A} = \sum f_V \cdot T \cdot N_V = 179732$  и 218054 кВт·ч (табл. 2.1, пятая и восьмая колонки).

Вторая методика основана на разбиении всей области случайных величин скорости на интервалы  $\Delta V = 0-1, 2-3, \dots$  вблизи средних скоростей ветра для градаций  $\bar{V}_{Гр}$  и определении повторяемости скорости ветра – относительные доли  $f_V$  попаданий скорости в каждый интервал  $\Delta V$ . В отечественной справочной литературе содержатся данные о дифференциальной вероятности  $f_V$  появления скорости ветра  $\bar{V}_{Гр}$  для следующих градаций: 0–1, 2–3, 4–5, 6–7, 8–9, 10–11, 12–13, 14–15, 16–17, 18–20, 21–24, 25–28, 29–34, 35–40, > 40 м/с. Средние скорости ветра для градаций соответственно равны  $\bar{V}_{Гр} = 0,5; 2,5; 4,5; 6,5; 8,5; 10,5; 12,5; 14,5; 16,5; 19,0; 22,5; 26,5; 31,5; 37,5; > 40$  м/с. В табл. 2.2 для ВЭУ с рабочим диапазоном  $\Delta V = 4-25$  м/с в первой колонке приведены  $\bar{V}_{Гр} = 2,5 \dots 19,0$  м/с; во второй колонке представлены величины показателя степенной функции, соответствующие конкретным значениям  $\bar{V}_{Гр}$  (например,  $m(\bar{V}_{Гр} = 2,5 \text{ м/с}) = 0,365$  и т.д.). Данные о средне-статистической зависимости  $m(V)$  используются при оценке скорости ветра на высоте оси ветроколеса  $H = 50-86$  м с помощью эмпирической зависимости степенного вида. Показатель степени  $m$  является функцией времени, рельефа и его неоднородности, климатических ресурсов конкретного участка территории и скорости ветра.

В п. Улья наблюдается ярко выраженный годовой ход скоростей ветра (высота флюгера  $H_{ФЛ} = 11$  м,  $\bar{V}_{I-XII} = 9,6, 7,9, 5,2, 4,2, 3,5, 3,8, 3,3, 3,6, 4,4, 6,0, 8,6, 9,7$  м/с соответственно). В последовательности  $k = 1,8, 2,0, 2,4$  в месяцы I, X и IV, VII величины  $\bar{A}_I, \bar{A}_X$  и  $\bar{A}_{IV}, \bar{A}_{VII}$  увеличивается на 2, 7; 4, 17 % и уменьшаются на 2, 5 и 7, 15 %. Следовательно, в условиях п. Улья в весенний и летний сезоны в сравнении с зимним выработки электроэнергии ВЭУ N43 уменьшаются на 52 и 62 % соответственно. При  $k = 1,8$  в I–XII месяцы время работы ВЭУ в интервалах скоростей ветра  $\Delta V = 4-8$  и 9–18 м/с

соответственно равны 188, 209, 331, 360, 393, 373, 396, 391, 352, 297, 205, 185 и 352, 317, 266, 188, 129, 153, 112, 139, 204, 307, 343, 351 ч. Видно, что в диапазоне сильных скоростей ветра наименьшая величина  $\Sigma f_V \cdot T = 404$  ч реализуется в летний сезон. В холодное полугодие при переходе от  $k = 1,8$  к  $2,4$  рост выработки электроэнергии, вероятно, обусловлен увеличением времени работы агрегата на 388 ч в интервале  $\Delta V = 9 - 18$  м/с. В теплое полугодие время работы ветроустановки в рассматриваемом диапазоне скоростей ветра уменьшается лишь на 13 %.

Таблица 2.1. Пункт Байдуков,  $\bar{V}_I = 5,6$ ,  $\bar{V}_{VII} = 6,8$ . Результаты оценки  $\bar{A}_I$ ,  $\bar{A}_{VII}$  для ВЭУ N43 при использовании аналитической функции скоростей ветра ( $k = 1,8$ )

V, м/с	N, кВт	Январь			Июль		
		$f_V$	$f_V \cdot T$ , ч	$\bar{A}$ , кВт·ч	$f_V$	$f_V \cdot T$ , ч	$\bar{A}$ , кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8
4	17	0,079	59	1004	0,063	47	799
5	45	0,085	63	2851	0,070	52	2329
6	72	0,087	65	4645	0,073	54	3917
7	124	0,085	63	7822	0,074	55	6836
8	196	0,080	60	11681	0,073	54	10630
9	277	0,073	55	15140	0,070	52	14405
10	364	0,066	49	17764	0,066	49	17745
11	444	0,057	43	18879	0,060	45	19880
12	533	0,049	36	19301	0,054	40	21511
13	584	0,041	30	17627	0,048	36	20874
14	618	0,033	25	15235	0,042	31	19243
15	619	0,027	20	12222	0,036	27	16529
16	618	0,021	16	9592	0,030	23	13942
17	619	0,016	12	7417	0,025	19	11628
18	620	0,012	9	5635	0,021	15	9564
19	610	0,009	7	4134	0,017	12	7624
20	594	0,007	5	2952	0,013	10	5936
21	592	0,005	4	2122	0,011	8	4670
22	590	0,003	3	1501	0,008	6	3628
23	580	0,002	2	1031	0,006	5	2747
24	575	0,002	1	704	0,005	4	2072
25	570	0,001	1	473	0,004	3	1545
		$\Sigma \bar{A} = 179732$			$\Sigma \bar{A} = 218054$		

Таблица 2.2. Результаты оценки  $\bar{A}_I$ ,  $\bar{A}_{VII}$  для ВЭУ N43 на основе экспериментального распределения скоростей ветра в условиях п. Байдуков

$\bar{V}_{гр}$ для $H_{фл}$	$m(V)$	$\bar{V}$ , м/с	$N$ , кВт	Январь		Июль	
		для $H_{ВЭУ} = 50$ м		$f_V$	$\bar{A}$ , кВт·ч	$f_V$	$\bar{A}$ , кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8
2,5	0,365	4,4	28,2	0,283	5938	0,168	3525
4,5	0,280	7,0	124,0	0,223	20573	0,200	18451
6,5	0,230	9,3	303,1	0,127	28639	0,191	43072
8,5	0,195	11,6	497,4	0,081	29975	0,136	50329
10,5	0,170	13,7	607,8	0,045	20349	0,098	44316
12,5	0,155	16,0	618,0	0,056	25748	0,070	32185
14,5	0,145	18,2	618,0	0,042	19311	0,048	22070
16,5	0,115	19,8	597,2	0,026	11552	0,025	11108
19,0	0,130	23,3	578,5	0,017	7317	0,015	6456
				$\Sigma \bar{A} = 169403$		$\Sigma \bar{A} = 231512$	

В п. Байдуков на высоте флюгера величины  $\bar{V}_{I-XII} = 5,6, 5,6, 5,2, 5,6, 5,3, 7,0, 6,8, 5,9, 6,3, 6,4, 7,1, 6,7$  м/с. Расчёты по первой схеме показали, что в этом пункте в ряду I–XII время работы и выработки электроэнергии установки мощностью 600 кВт при  $V = 4–7, 8–18$  и  $19–25$  м/с соответственно равны 250, 226, 265, 242, 262, 196, 208, 239, 216, 221, 193, 211; 353, 319, 333, 341, 338, 380, 391, 365, 367, 382, 382, 388; 22, 18, 15, 21, 17, 50, 47, 28, 35, 38, 53, 45 ч и 16, 15, 17, 16, 17, 13, 14, 16, 14, 15, 13, 14; 150, 136, 139, 146, 142, 173, 176, 158, 162, 169, 174, 174; 13, 12, 9, 12, 10, 30, 28, 16, 21, 23, 31, 27 тыс. кВт·ч. В VI, VII, IX–XII относительно большие величины  $\bar{A}_M$  обусловлены увеличением времени работы установки при сильных скоростях ветра.

При выполнении расчётов среднестатистическая зависимость  $m(V)$  может быть представлена следующим образом: для  $V = 1,5, 3,5, 5,5, 7,5, 9,5, 11,5, 13,5, 15,5, 17,5, 20,5, 24,5, 28,5, 34,5$  и  $> 40$  м/с величины  $m$  соответственно равны 0,42, 0,31, 0,25, 0,21, 0,18, 0,16, 0,15, 0,14, 0,13, 0,13, 0,13, 0,12, 0,12, 0,12. В третью колонку сведены середины градаций  $\bar{V}_{гр}$  для высоты  $H = 50$  м; в четвёртой – развиваемые мощности ВЭУ для конкретных скоростей ветра; в пятой – вероятности  $f_V$  для середины градаций  $\bar{V}_{гр} = 2,5$  м/с ( $H = 10,3$  м) и 4,4 м/с ( $H = 50$  м) и т. д.; в шестой и восьмой – выработки  $\bar{A} = \Sigma f_V \cdot T \cdot N_V$  для конкретных  $\bar{V}_{гр}$ . Выработки электроэнергии ВЭУ за месяцы I и VII определяются в виде  $\bar{A} = \Sigma f_V \cdot T \cdot N_V = 169403$  и 231512 кВт·ч соответственно.

Из анализа данных табл. 2.1, 2.2 следует, что для ВЭУ мощностью 600 кВт, с начальной и номинальной скоростями ветра 4,0 и 14,0 м/с соответственно и высотой башни  $H = 50$  м с ростом  $\bar{V}_M$  от 5,6 до 6,8 м/с наблюдается увеличение вероятности  $f_V$ , времени работы  $f_V \cdot T$  и выработки электроэнергии установки  $\bar{A}_M$  при скоростях ветра  $V \geq 11,0$  м/с. Например, при переходе от января к июлю по первой и второй схемам расчёта значение  $f_V \cdot T$  и  $\bar{A}_M$  для  $V \geq 11,0$  м/с увеличивается на 34, 47 и 36, 46 % соответственно.

Величина  $\bar{A}$  весьма существенно зависит от значения  $k$ . В п. Байдуков среднегодовая выработка электроэнергии ВЭУ N43 в ряду  $k = 1,8, 2,0, 2,4$  характеризуется величинами 2313, 2378, 2448 тыс. кВт·ч. Оказалось, что установленное по второй схеме расчёта  $\bar{A}_T = 2322$  тыс. кВт·ч хорошо согласуется с величиной  $\bar{A}_T = 2312$  тыс. кВт·ч, полученной по первой схеме расчёта. Отметим, что в этом пункте для ВЭУ мощностью 2750 кВт при  $k = 1,8$   $\bar{A}_3 = 2920$  и 2806;  $\bar{A}_B = 2753$  и 2747;  $\bar{A}_T = 3182$  и 3489;  $\bar{A}_O = 3165$  и 3391 и  $\bar{A}_T = 21020$  и 21433 тыс. кВт·ч, найденные по первой и второй схемам расчёта соответственно, описываются относительно близкими величинами. В п. Сюркум в последовательности  $k = 1,6, 1,8, 2,0, 2,4$  ожидаемые выработки электроэнергии установки соответственно равны 2348, 2473, 2561, 2666 тыс. кВт·ч, т. е. увеличиваются на 13 %. Сравнение среднегодовых выработок  $\bar{A}_T$  при различных  $k$  и экспериментальной величины  $\bar{A}_T = 2327$  тыс. кВт·ч позволило уяснить оптимальную величину  $k = 1,6$ .

## **2.10. Разработка технологии возобновляемой энергии в условиях арктических островов, побережья морей и внутренних ветровых районов**

В последнее время в мире большое внимание уделяется разработке схем размещения, конструированию и строительству ВЭГК на побережьях морей и во внутренних ветровых районах. Решение этих задач в северных регионах требует уяснения качества ветроэнергетической техники для конкретной местности.

Рассмотрим энергетическую эффективность ВЭУ мощностью 225–2500 кВт в климатических условиях Мурманской, Архангельской, Тюменской областей и Республики Коми на основе анализа средних скоростей ветра  $\bar{V}$  и выработки энергии ВЭУ ( $\bar{A}$ , кВт·ч) в месяцы I–XII и за год. При анализе климатических ресурсов ветра использовались данные статистического анализа характеристик ветра и аналитические функции распределения скорости ветра. Особое внимание уделено определению ресурсов ветра в зимние, весенние, летние и осенние месяцы. Показана целесообразность ис-

пользования современных ВЭУ различных классов с начальной и номинальной скоростями ветра 2,5–4,0 и 11,5–16,0 м/с соответственно в пунктах с преобладанием сильных и умеренных ветров. Даны дневные критерии шума для пунктов, характеризующихся в январе  $\bar{V} \geq 6,0$  м/с.

Оценка производительности ВЭУ базируется на корректной климатической информации. Для получения этих данных оценены ветровые ресурсы на участках со скоростями ветра  $\bar{V} \geq 5,5$  м/с. Уяснены изменения  $\bar{V}$  во времени: межгодовые, годовые, сезонные, суточные. Величины  $\bar{A}_T$  получены с учетом потерь от 3 до 5 % электроэнергии агрегата с целью исключения обледенения ВЭУ путем нагрева.

В климатических условиях, приближенных к мурманским, можно использовать ВЭУ российско-украинского производства типа АВЭ-250 с  $N = 250$  кВт.

В п. Харловка ( $\bar{V}_T = 7,3$  м/с), Терско-Орловский маяк (7,4), Вайда-Губа (8,1), Дальне-Зеленецкая (8,2) Мурманской обл. и остров (о.) Рудольфа (7,1), м. Болванский (7,1), Столбовой (7,4), о. Моржовец (7,4), Болванский Нос (7,6), Амдерма (7,9), Колгуев, Северный (7,9), Канин Нос (8,1), м. Желания (8,2), Малые Кармакулы (8,3) Архангельской обл. можно применять ВЭУ «Радуга-1» с  $N = 1$  МВт, расчетной скоростью ветра  $V_p^n = 13,6$  м/с и высотой башни  $H = 36$  м. В п. Терско-Орловской маяк среднегодовая развиваемая мощность агрегата  $\bar{N}_T \geq 460$  кВт и суммарное время работы за год  $\sim 6000$  ч. Из-за относительно большой начальной скорости ветра ВЭУ  $V_p^{\min} = 5,0$  м/с и малой величины  $H$  установку «Радуга-1» целесообразно эксплуатировать на участках с сильным ветром и  $\bar{V}_{VI-VIII} > 5,0$  м/с.

ВЭУ типа NORWIN 29–STALL–225 kW имеет следующие технические характеристики:  $N = 225$  кВт,  $V_p^{\min} = 4,0$  м/с,  $V_p^n = 15,0$  м/с,  $D = 29$  м и  $H = 25$  м. В п. Дальне-Зеленецкая, Амдерма и о. Моржовец для случая распределения скорости ветра по Релею ожидаемые величины  $\bar{A}_T$  и коэффициента использования  $K_{исп}$  соответственно равны 883, 936, 838 тыс. кВт·ч и 0,45, 0,47, 0,42. Для ВЭУ NORWIN–225 kW в условиях п. Дальне-Зеленецкая и Амдерма относительные величины  $\bar{A}_3 : \bar{A}_B : \bar{A}_D : \bar{A}_O = 1,00 : 0,84 : 0,43 : 0,81$  и  $1,00 : 0,89 : 0,66 : 0,90$  соответственно. Лучшие условия для эксплуатации этого ВЭУ реализуются в п. Амдерма с относительно высокими значениями  $\bar{V}_{VI-VIII}$ .

На севере РФ можно использовать ВЭУ NORWIN 47–ASR–750 kW с  $N = 750$  кВт,  $V_p^{\min} = 3,0$  м/с,  $V_p^n = 15,0$  м/с,  $D = 47$  м и  $H = 43$  м.

Пункт Терско-Орловский маяк и о. Моржовец характеризуются ярко выраженным годовым ходом скорости ветра и на высоте флюгера величины  $\bar{V}_{I-XII}$  соответственно равны 9,2; 8,6; 8,6; 7,1; 6,3; 5,7; 5,3; 5,4; 6,7; 8,0; 8,5; 9,0 и 8,7; 7,8; 7,5; 6,3; 6,4; 6,7; 6,5; 6,1; 7,0; 8,5; 9,1; 9,0 м/с. В п. Терско-Орловский маяк и о. Моржовец для рассматриваемого агрегата относительные величины  $\bar{A}_3 : \bar{A}_B : \bar{A}_L : \bar{A}_O$  соответственно равны 1,00:0,87:0,63:0,91 и 1,00:0,76:0,79:0,97. Причем производительность ВЭУ в летний сезон составляет  $\leq 729$  тыс. кВт·ч. В этих пунктах ВЭУ NORWIN–750 kW с различной степенью эффективности можно эксплуатировать в течение года.

Средняя выработка энергии ВЭУ NORDEX N 43/600 ( $N = 600$  кВт,  $V_p^{\min} = 4,0$  м/с,  $V_p^n = 15,0$  м/с,  $H = 40$  м) в месяцы I–XII и за год в п. Болванский Нос (7,6), м. Столбовой (7,4), Харловка (7,3) и залив Благополучие соответственно составит 185–263, 2767; 132–270, 2444; 143–275, 2429 и 153–235, 2239 тыс. кВт·ч. В п. Болванский Нос, м. Столбовой, залив Благополучия величина производительности ВЭУ N 43 с высотой башни 50 м по сравнению с  $H = 40$  м соответственно увеличивается на 7,0, 5,0 и 4,5 %. ВЭУ N 43 можно использовать в пунктах с  $\bar{V}_T \geq 6,0$  м/с в суровых климатических условиях севера РФ.

В п. Пялица (6,1), Нагурская (6,4), о. Моржовец (7,4), м. Столбовой (7,4) и Русская Гавань (7,1) в ряду месяцев I–XII ожидаемые выработки энергии ВЭУ N 60 ( $N = 1300$  кВт) составляют 500, 419, 435, 373, 385, 373, 394, 326, 357, 457, 499, 515; 471, 414, 428, 367, 379, 354, 398, 360, 395, 441, 430, 452; 550, 476, 511, 425, 444, 450, 450, 422, 469, 553, 554, 568; 577, 521, 544, 478, 436, 351, 321, 403, 467, 499, 536, 577 и 591, 517, 529, 492, 419, 391, 343, 428, 470, 557, 561, 594 тыс. кВт·ч;  $\bar{A}_3 : \bar{A}_B : \bar{A}_L : \bar{A}_O$  равны 1,00:0,83:0,76:0,91; 1,00:0,84:0,78:0,92; 1,00:0,86:0,82:0,98; 1,00:0,87:0,64:0,90 и 1,00:0,84:0,68:0,93 соответственно. В п. Русская Гавань и м. Столбовой с ярко выраженным годовым ходом скорости ветра в летние месяцы в сравнении с зимними выработка электроэнергии уменьшается на 32 и 36 % соответственно.

В пунктах с  $\bar{V}_T = 5,7$  и 6,0 м/с достаточно большие выработки электроэнергии можно получить путем применения крупных ВЭУ типа NORDEX 80 мощностью 2500 кВт, с  $V_p^{\min} = 4,0$ ,  $V_p^n = 15,0$  м/с,  $H = 60, 80, 100$  м. Например, для п. Мурманск, Халдеев мыс (5,7) и Варандей (6,0) выработки агрегата соответственно составят 9052 и 9782 тыс. кВт·ч.

Эксплуатационные показатели среднего и крупного ВЭУ для пунктов Республики Коми и Тюменской обл. сведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Эксплуатационные показатели ВЭУ типа NORWIN 29–STALL–225 kW (1) и NORWIN 47–ASR–750 kW (2) при различных величинах параметра крутизны распределения  $k$

№ п/п	Область, пункт	Тип ВЭУ	$k$	Относительные величины выработки энергии				$\bar{A}_T$ , тыс. кВт·ч
				Зима	Весна	Лето	Осень	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Республика Коми, Полярный Урал ( $\bar{V}_T \geq 6,8$ м/с)	1	1,8	1,00	0,89	0,59	0,75	775
			2,0	1,00	0,87	0,56	0,72	797
			2,4	1,00	0,85	0,51	0,69	822
		2	1,8	1,00	0,92	0,68	0,81	2915
			2,0	1,00	0,91	0,65	0,79	3026
			2,4	1,00	0,89	0,60	0,76	3168
2	Тюменская обл., м. Харасовой (7,0)	1	2,0	1,00	0,94	0,81	0,99	810
3	Се-Яга (7,4)	1	2,0	1,00	0,91	0,74	0,90	887
		2	2,0	1,00	0,94	0,81	0,93	3295
4	Маре-Сале (7,0)	1	2,0	1,00	0,93	0,76	1,02	783
		2	1,8	1,00	0,96	0,82	1,02	2879
			2,0	1,00	0,95	0,80	1,02	2983
			2,4	1,00	0,94	0,78	1,05	3115
	2	Маре-Сале (расчеты для экспериментального распределения $V$ )	2	–	1,00	0,93	0,79	1,03
5	Ра-Из (8,0)	1	2,0	1,00	1,01	0,78	0,97	980
		2	2,0	1,00	1,01	0,85	0,98	3547

Результаты исследований показали, что в пунктах с умеренными и слабыми ветрами целесообразно использовать ВЭУ с  $V_p^{\min} = 2,5–3,0$  м/с,  $V_p^n = 11,0–13,0$  м/с и  $H = 60–100$  м. В пунктах с сильными и умеренными скоростями ветра энергетически эффективно применять крупное ВЭУ с  $V_p^{\min} = 2,5–4,0$ ,  $V_p^n = 13,0–16,0$  м/с и  $H \geq 40$  м.

Для рассмотренных пунктов результаты линейного тренд-анализа межгодовых колебаний скорости ветра отсутствуют. Отметим, что в п. Терско-Орловский маяк при уменьшении  $\bar{V}$  на 5 % снижение выработки ВЭУ с  $V_p^n = 10,0$  и  $13,6$  м/с составит 6,7 и 11,0 % соответственно.

В условиях п. Амдерма в месяцы I, IV, VII, X при экспериментальном и теоретическом распределениях скорости ветра выработки энергии ВЭУ N 50

будут равны 414, 375, 273, 365 и 368, 334, 250, 352 тыс. кВт·ч соответственно. Этот факт свидетельствует о том, что функции распределения скорости ветра по Вейбуллу и Релею могут быть использованы для ориентировочной оценки эксплуатационных характеристик ВЭГК на арктических островах и побережьях.

Рассмотрим проблему использования энергии ветра в Хабаровском крае. Благоприятные условия для применения ВЭ наблюдаются в следующих пунктах на побережье Охотского моря и Татарского пролива: п. 1 – Улья,  $\bar{V}_Г = 5,7$ ,  $\bar{V}_3 = 9,0$ ,  $\bar{V}_В = 4,2$ ,  $\bar{V}_Л = 3,5$ ,  $\bar{V}_0 = 6,2$  м/с; 2 – Чумикан, 5,3, 8,5, 3,6, 3,0, 6,1; 3 – Байдуков, 6,0, 5,9, 5,3, 6,4, 6,4; 4 – Сюркум, 6,6, 7,4, 6,7, 6,1, 6,4, а также в п. 5 – Хабаровск, БГСМ, 5,1, 4,9, 5,5, 4,5, 5,6. Видно, что из-за ярко выраженного годового хода скорости ветра крупные генерирующие комплексы целесообразно строить в п. 3, 4 с преимущественно умеренными ветрами.

Для установления энергетической эффективности ВЭУ мощностью 600–2750 кВт (табл. 2.4) в отмеченных пунктах выполнен анализ их эксплуатационных показателей (табл. 2.5).

Таблица 2.4. Технические характеристики ВЭУ

Тип ВЭУ	$V_p^{\min}$	$V_p^n$	$V_p^{\max}$	$N$ , кВт	$D$	$H$
	м/с				м	
1	4,0	14,0	25,0	600	43	50
2	3,0	13,0	23,0	1250	60	68,5
3 а	4,0	16,0	25,0	2000	80	78
3 б	4,0	16,0	25,0	2000	80	80
4	3,0	17,0	25,0	2000	71,2	80
5 а	3,0	14,0	25,0	2000	80	85
5 б	3,0	14,0	25,0	2000	80	95
6	2,0	13,0	25,0	2000	70	86
7	4,0	13,0	25,0	2300	90	80
8	4,0	15,0	25,0	2500	80	80
9	4,0	16,0	25,0	2750	92	80

Рассмотрим возможность применения в п. Чумикан ветроустановок с различными величинами  $V_p^{\min}$ ,  $V_p^n$  и  $H$ . Пункт 2 характеризуется в месяцы I, XI, XII сильными скоростями ветра –  $\bar{V}_I = 9,6$ ,  $\bar{V}_{XI} = 9,0$ ,  $\bar{V}_{XII} = 10,4$  м/с ( $H_{ФЛ} = 14,4$  м), в II, X умеренными –  $\bar{V}_{II} = 7,0$ ,  $\bar{V}_X = 5,9$  м/с и в III–VIII слабыми –  $\bar{V} = 3,0 – 4,7$  м/с.

Таблица 2.5. Выработка электроэнергии ВЭУ в условиях Хабаровского края

№ п/п	Пункт; тип ВЭУ; схема расчёта; $k$	Выработка электроэнергии ВЭУ, $\bar{A}$ тыс. кВт·ч				
		Относительные величины $\bar{A}_{3,В,Л,О}$				$\bar{A}_Г$
		$\bar{A}_3$	$\bar{A}_В$	$\bar{A}_Л$	$\bar{A}_О$	
1	2	3	4	5	6	7
1 а	2; 1; 1; 2,0	746	239	157	529	1671
1 б		1,00	0,32	0,21	0,71	
2 а	2; 2; 1; 1,8	1412	686	501	1165	3764
2 б		1,00	0,49	0,36	0,82	
3 а	2; 3 а; 1; 2,0	2644	1144	832	2061	6683
3 б		1,00	0,43	0,31	0,78	
4 а	2; 3 б; 1; 2,0	2650	1163	850	2075	6738
4 б		1,00	0,44	0,32	0,78	
5 а	2; 4; 1; 2,0	2508	1003	709	1909	6130
5 б		1,00	0,40	0,28	0,76	
6 а	2; 5 а; 1; 2,0	2717	1259	936	2167	7079
6 б		1,00	0,46	0,34	0,80	
7 а	2; 5 б; 1; 2,0	2739	1345	1020	2227	7331
7 б		1,00	0,49	0,37	0,81	
8	2; 6; 1; 2,0	2667	1160	844	2085	6757
9 а	2; 7; 1; 2,0	3138	1416	1040	2484	8079
9 б		1,00	0,45	0,33	0,79	
10 а	2; 9; 1; 2,0	3602	1555	1130	2807	9094
10 б		1,00	0,43	0,31	0,78	
11 а	3; 3 а; 2	2041	2000	2542	2471	9054
11 б		0,80	0,78	1,00	0,99	
12 а	3; 3 а; 1; 2,0	2191	2038	2415	2404	9049
12 б		0,91	0,84	1,00	0,99	
13 а	3; 6; 1; 1,8	2113	1982	2313	2302	8711
13 б		0,91	0,86	1,00	0,99	
14 а	3; 7; 1; 1,8	2574	2440	2794	2779	10588
14 б		0,92	0,87	1,00	0,99	
15 а	3; 9; 1; 1,8	2920	2753	3182	3165	12020
15 б		0,92	0,86	1,00	0,99	
16 а	4; 3 а; 1; 1,8	2421	2355	2207	2256	9239
16 б		1,00	0,97	0,91	0,93	

Продолжение табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7
17	4; 3 а; 1; 2,0	2558	2471	2296	2358	9684
18	4; 3 б; 1; 2,0	2568	2488	2311	2371	9735
19 а	4; 4; 1; 1,8	2283	2209	2057	2110	8659
19 б		1,00	0,97	0,90	0,92	
20 а	4; 4; 1; 2,0	2412	2316	2136	2202	9066
20 б		1,00	0,96	0,89	0,91	
21	4; 5 а; 1; 2,0	2649	2575	2410	2465	10099
22 а	4; 5 б; 1; 2,0	2686	2626	2472	2521	10305
22 б		1,00	0,98	0,92	0,94	
23 а	4; 6; 1; 1,8	2443	2381	2234	2282	9340
23 б		1,00	0,97	0,91	0,93	
24 а	4; 6; 1; 2,0	2587	2503	2328	2389	9807
24 б		1,00	0,97	0,90	0,92	
25	4; 7; 1; 1,8	2883	2816	2649	2702	11051
26 а	4; 7; 1; 2,0	3051	2960	2764	2831	11605
26 б		1,00	0,97	0,91	0,93	
27 а	4; 9; 1; 1,8	3296	3207	3005	3072	12581
27 б		1,00	0,97	0,91	0,93	
28 а	4; 9; 1; 2,0	3485	3367	3128	3212	13192
28 б		1,00	0,97	0,90	0,92	
29 а	5; 1; 1; 2,0	456	541	403	541	1941
29 б		0,84	1,00	0,74	1,00	
30	5; 3 а; 1; 2,0	1896	2162	1747	2154	7960
31 а	5; 3 б; 1; 2,0	1914	2179	1767	2170	8031
31 б		0,88	1,00	0,81	1,00	
32 а	5; 4; 1; 2,0	1736	2000	1584	1994	7315
32 б		0,87	1,00	0,79	1,00	
33 а	5; 1; 1; 2,0	456	541	403	541	1941
33 б		0,84	1,00	0,74	1,00	
34 а	5; 3 а; 1; 2,0	1896	2162	1747	2154	7960
34 б		0,88	1,00	0,81	1,00	
35	5; 3 б; 1; 2,0	1914	2179	1767	2170	8031
36 а	5; 4; 1; 2,0	1736	2000	1584	1994	7315
36 б		0,87	1,00	0,79	1,00	
37 а	5; 5 а; 1; 1,8	1963	2199	1840	2186	8188
37 б		0,89	1,00	0,83	0,99	

1	2	3	4	5	6	7
38 а	5; 5 а; 1; 2,0	2020	2283	1878	2272	8453
38 б		0,88	1,00	0,82	1,00	
39 а	5; 5 б; 1; 2,0	2099	2354	1966	2341	8760
39 б		0,89	1,00	0,84	0,99	
40	5; 6; 1; 2,0	1927	2195	17777	21860	8085
41 а	5; 7; 1; 2,0	2305	2613	2136	2601	9654
41 б		0,88	1,00	0,82	1,00	
42	5; 9; 1; 2,0	2583	2946	2380	2935	10844

Очевидно, что из-за сильного уменьшения выработки в весенний и летний периоды ВЭУ 1 в условиях п. 2 нецелесообразно эксплуатировать в течение года. Из расчётов эксплуатационных показателей ВЭУ 2 в условиях п. Чумикан следует, что средние выработки электроэнергии за I–XII месяцы соответственно составят  $\bar{A}_{1-XII} = 501, 412, 316, 211, 159, 144, 149, 208, 280, 403, 482, 499$  тыс. кВт·ч. Оценки  $\bar{A}_{3,В,Л,О}$  для установок 2, 5–7 с относительно малыми  $V_p^{\min}$ ,  $V_p^n$  и установок 1, 3, 4, 9 с  $V_p^n = 14,0–17,0$  м/с показали, что в летний период в сравнении с зимним выработки электроэнергии для агрегатов 2, 5–7 и 1, 3, 4, 9 соответственно уменьшаются на 64,5, 65,5, 56,5, 66,8 и 78,9, 67,9, 71,7, 68,6 %. Из табл. 2.5, п/п 3 б–10 б следует, что для ВЭУ 3–9 относительные величины  $\bar{A}_{3,В,Л,О}$  соответственно равны 1,00, 0,40–0,49, 0,21–0,37, 0,71–0,82. Меньшее различие  $\bar{A}_3$  и  $\bar{A}_В$ ,  $\bar{A}_Л$  наблюдается лишь для ветроагрегатов 2, 5–9 с малыми  $V_p^{\min}$ ,  $V_p^n$  и большими  $H$  и  $D$  (табл. 2.5, п/п 2 б, 5 б–9 б). Следовательно, в п. Чумикан из-за малой выработки электроэнергии ВЭУ 2–9 в весенний и летний периоды эксплуатация их не является энергетически выгодной.

ВЭУ типа 1 наиболее приспособлены к суровым климатическим условиям Дальнего Востока. Из анализа средних месячных скоростей ветра для п. Байдуков ( $\bar{V}_{I-XII} = 5,6, 5,6, 5,2, 5,6, 5,3, 7,0, 6,8, 5,9, 6,3, 6,4, 7,1, 6,7$  м/с) и Сюркум (7,2, 7,9, 7,1, 6,5, 6,9, 6,4, 6,3, 5,9, 6,1, 6,3, 7,2, 7,5) и оценки величин параметра  $\bar{N}$  для рассматриваемой ВЭУ с  $H = 50$  м в зимние, весенние, летние и осенние месяцы следует, что этот агрегат с различной степенью эффективности можно использовать в этих пунктах в течение года. В п. 3 и 4 в месяцы I – XII установка будет работать в режиме 48, 48, 45, 48, 45, 57, 56, 50, 53, 54, 58, 56 и 57, 61, 57, 53, 55, 52, 52, 49, 50, 52, 57, 59 % расчётной мощности соответственно.

В п. Байдуков и Сюркум для ВЭУ 3 а, 6 наблюдаются близкие и относительно большие величины  $\bar{A}_{3,в,л,о}$  и  $\bar{A}_Г$  (табл. 2.5, п/п 12 а, 13 а, 17 а, 24 а) и поэтому их целесообразно применять в течение года. Из рассмотрения табл. 2.5 можно заключить, что большие производительности ВЭС при  $\bar{V}_Г = 6,1$  и  $6,7$  м/с могут быть получены путём использования ВЭУ с  $V_p^{\min} = 2,0 - 4,0$  м/с,  $V_p^n = 13,0 - 17,0$  м/с и  $H = 40 - 95$  м.

Расчёты эксплуатационных характеристик ветроустановок при  $k = 1,8$  в условиях п. 3, 4 показали, что для ВЭУ 3, 4; 7 и 9 по сравнению с 1 среднегодовые выработки электроэнергии увеличиваются в 3,73–3,99; 4,47–4,58 и 5,09–5,20 раза. Близкий характер изменения  $\bar{A}_Г$  в ряду ВЭУ 1, 3 – 6, 7 и 9 наблюдается при расчётах с  $k = 2,0$ . В условиях п. Сюркум при переходе от ВЭУ 5 а к 5 б происходит заметное увеличение  $\bar{A}_Г$ .

В п. Хабаровск малые выработки электроэнергии крупных ВЭУ различных типов следует ожидать в месяцы I, II, VI – VIII из-за слабых ветров  $\bar{V}_{I,II,VI-VIII} = 4,3 - 4,6$  м/с (табл. 2.5, п/п 33–42). Вероятно, энергетическая эффективность крупных ВЭС в данном пункте может быть достигнута в III – V, IX – XII месяцы.

В табл. 2.6 даны дневные критерии шума для ряда пунктов северных регионов с  $\bar{V}_Г \geq 6,0$  м/с.

Таблица 2.6. Дневные критерии шума для пунктов северных регионов при средних скоростях ветра в январе  $\geq 6,0$  м/с

Средняя скорость ветра в январе, м/с	$\geq 6,0 - 7,0$	$> 7,0 - 8,0$
Уровни давления звука* $L_p$ , дБ (А)	36,5–40,0	$> 40,0 - 43,0$
Область, пункт	Мурманская обл., Перевал, Мурманск, Халдеев мыс, Кашкаранцы; Архангельская обл.; Бухта Тихая, Маточкин Шар, Варандей, Инцы; Республика Коми, Воркута; Тюменская обл., Гыда-Ямо, Тидибе-Яга, мыс Каменный, Тазовское, Ялуторовск	Мурманская обл., Пялица, Чаваньга, о. Соновец; Архангельская обл., мыс Выходной, мыс Меньшикова, Усть-Кара, Шойна, Индига; Тюменская обл., Тамбей, мыс Харасовой, Маре-Сале

\*Величины  $L_p$  соответствуют средним скоростям ветра за 10 мин на высоте флюгера 10 м.

### Контрольные вопросы

1. Каковы основные тенденции развития ветроэнергетики в мире?
2. Назовите наиболее перспективные для развития ветроэнергетики участки территории России.
3. Объясните различие скоростей ветра на побережье морей и во внутренних ветровых районах.
4. Каковы величины параметра  $\bar{V}_T$  для районов со слабыми, средними и сильными скоростями ветра?
5. Сформулируйте основные закономерности годового и суточного хода скорости ветра для различных регионов Российской Федерации?
6. Напишите выражение для определения скорости воздушного потока на оси ветроколеса.
7. Назовите характеристики ветрового режима для оценки ветроэнергетических ресурсов в предполагаемых районах размещения ВЭУ.
8. Назовите основные технические характеристики современных ВЭУ.
9. Разъясните принцип действия горизонтально- и вертикально-осевых ВЭУ.
10. По каким основным климатическим данным определяют величины начальной и номинальной скоростей ветра ВЭУ?
11. Объясните методики определения времени работы ветроагрегата в рабочем диапазоне скоростей, развиваемой мощности и средней производительности ВЭУ в заданный период.
12. Какие типы ВЭУ являются наиболее употребительными для районов со слабыми, умеренными и сильными скоростями ветра?
13. Какие технические проблемы следует решить для развития ветроэнергетики в северных регионах?
14. В какие месяцы целесообразно проводить плановые ремонты работы ВЭУ с относительно большими номинальными скоростями ветра в пунктах с ярко выраженным годовым ходом скорости ветра?
15. Сформулируйте основные положения линейной модели в ветроэнергетике.
16. По какому выражению оценивается удельная мощность ветрового потока?
17. Определение коэффициента быстроходности в ветроэнергетике.
18. Что такое коэффициент мощности  $C_N$ ? Зависимость  $C_N$  от  $Z$  для ветроагрегата с постоянной частотой вращения.
19. Зависимость коэффициента  $C_N$  от скорости ветра для ВЭУ с постоянной и переменной частотой вращения.

20. Назовите величину коэффициента торможения  $a$  для  $C_N^{\max}$  в рамках линейной модели.
21. Объясните различия двух способов регулирования режима работы ветроколеса.
22. Каковы классы ветроэнергетических систем?
23. Какие методики согласования ВЭУ – потребитель используются на практике?
24. С какой целью применяется совместная работа ВЭУ и дизель-генератора?
25. Объясните существующие методики оценки эксплуатационных показателей г.-о. ветроагрегатов.
26. Какова энергетическая эффективность ветроэлектрических генерирующих комплексов в северных регионах и на Дальнем Востоке России?

## Глава 3. ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

### 3.1. Введение

Гидроэнергетика – область энергетики, использующая энергию падающей воды, которая преобразуется в электрическую (иногда в механическую). Гидроэнергетика – наиболее развитая область энергетики на возобновляемых ресурсах. Экономический потенциал гидравлической энергии в мире оценивается в 8100 ТВт·ч, установленная мощность ГЭС составляет 669 ГВт, выработка электроэнергии – 2691 ТВт·ч и экономический потенциал используется на 33 %. В России величина  $N_{э,п} = 600$  ТВт·ч и этот потенциал используется на 26 %. Установленная мощность ГЭС страны равна 43940 МВт. Доля МГЭС и микроГЭС в экономическом потенциале примерно равна 10 % [27].

Вырабатываемую ГЭС энергию легко регулировать. Если  $Q$  – объем воды, падающей на лопасть в единицу времени,  $\rho Q$  – масса падающей воды и  $H$  – высота падающей воды, то изменение в единицу времени потенциальной энергии воды (мощность) равно  $N_0 = \rho Q g H$ . Местоположение ГЭС должно обеспечивать достаточно высокий расход воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, и напор  $H$ , м. Обычно для этого требуется годовой уровень осадков не менее 40 см, выпадающих достаточно равномерно в течение года, определенный рельеф местности и территория для водохранилища. Если эти условия выполняются, гидроэнергия будет наиболее подходящим источником электроэнергии.

Все крупные ГЭС имеют не промерзающие до дна водохранилища, обеспечивающие аккумуляцию энергии. Когда в энергосети имеется избыток мощности, вода накапливается при высоте подъема  $H$ . С ростом потребности в энергии воду пропускают через турбины в нижний бассейн, обеспечивая генерирование электроэнергии. В ГАЭС агрегаты работают как насосы и как турбины. При использовании дамбы высотой 100 м плотность запасаемой потенциальной энергии  $W_V = 1$  МДж/м<sup>3</sup> [38]. МГЭС должны работать в основном по водотоку в комплексе с малыми накопителями энергии (НЭ).

КПД гидротурбин составляет примерно 90 %. Они бывают двух типов: активные гидротурбины, рабочее колесо которых вращается в воздухе, натекающем на его лопасти потоком воды, и реактивные гидротурбины, рабочее колесо которых полностью погружено в воду и вращается в основном за счет разности давлений до и за колесом.

### 3.2. Активные гидротурбины

Они используются на плотинных ГЭС, которые включают: водохранилище, подводный водовод, регулятор расхода воды, гидротурбину, электрогенератор, систему контроля и управления параметрами генератора, электро-распределительную систему.

Работа активной гидротурбины основана на использовании кинетической энергии потока. Для этого потенциальную энергию воды перед турбиной превращают в кинетическую энергию струи, которую направляют на лопасти, расположенные на ободу колеса. Взаимодействие с ковшом изменяет направление движения струи. Следовательно, со стороны лопасти на струю действует сила, а значит, такая же по величине сила действует и на лопасть, приводя во вращение турбину. Рабочее колесо турбины вращается в воздухе, статическое давление в любой точке струи при этом постоянно и равно атмосферному.

Максимум мощности обеспечивается для случая

$$\frac{U_t}{U_j} = 0,5, \quad (3.1)$$

где  $U_t$  – скорость движения ковша, м/с;  $U_j$  – скорость набегающего потока, м/с.

Сопла регулируют так, чтобы струи воды набегали на лопасти перпендикулярно и с оптимальной скоростью.

Скорость набегающего потока

$$U_j^2 = 2g \cdot H_a, \quad (3.2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H_a$  – рабочий (располагаемый) напор, м, который равен разности геометрического (полного) напора  $H_t$ , м, и потерь напора  $H_f$ , м, на трение в каналах и водоводах на пути к турбине:

$$H_a = H_t - H_f. \quad (3.3)$$

Величина  $H_f$  пропорциональна длине водовода. На практике стремятся к выполнению условия  $H_f \leq H_t/3$ .

Если колесо турбины радиусом  $R$ , м, вращается с угловой скоростью  $\omega$ , рад/с, то:

$$R = 0,5 \cdot (2g \cdot H_a)^{\frac{1}{2}} / \omega, \quad (3.4)$$

$$L = \frac{N_{\max}^{\frac{1}{2}} \cdot \omega}{\rho^{\frac{1}{2}} \cdot (g \cdot H_a)^{\frac{5}{4}}}, \quad (3.5)$$

где  $L$  – безразмерный коэффициент быстроходности;  $N_{\max}$  – теоретическая (паспортная) мощность, Вт;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

### 3.3. Реактивные турбины

Реактивные турбины используются на деривационных ГЭС. Такие ГЭС вместо плотины имеют невысокую подпорную стенку.

Турбина может работать при реверсировании генератора как насос, закачивая воду обратно с КПД, близким к 80 %. Выражение для коэффициента быстроходности  $L$  имеет вид (3.5). Из этой формулы следует, что при заданной мощности  $N_{\max}$ , Вт, и угловой скорости  $\omega$ , рад/с, чем меньше напор, тем большее значение коэффициента  $L$  должно быть у турбины.

Гидротурбины могут быть следующих типов:

**1. Осевые (пропеллерные).** Они могут располагаться как в открытых, так и в закрытых камерах с вертикальным либо горизонтальным положением ротора (табл. 3.1).

**2. Радиально-осевые.** Выполняются в металлической спиральной камере. Компонировка предусматривает горизонтальное положение ротора.

**3. Ковшовые.** Используются на ГЭС с большим напором воды. Предусмотрено горизонтальное расположение ротора (табл. 3.1).

**4. Диагональные.**

Таблица 3.1. Основные технические характеристики отечественных гидроагрегатов с пропеллерными и ковшовыми турбинами

Параметры	Пропеллерные		Ковшовые	
	ГА-1	ГА-8	ГА-5	ГА-10
Мощность, кВт	100–500	150–1500	145–620	290–3000
Напор, м	3,5–9	10–25	150–250	200–450
Расход, м <sup>3</sup> /с	2–8	2,5–7,0	0,13–0,33	0,19–0,9
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	200–500	500	500–600	750–1000

Срок службы турбин составляет 40 лет, срок между капитальными ремонтами – 6–10 лет. Стоимость 1 кВт установленной мощности ориентировочно составляет 200–300 долларов США в зависимости от типа турбин и вырабатываемой мощности.

Для каждого типа турбины существуют зависимости между параметром  $L$ , определяющим условия работы турбины с максимальным КПД, и параметрами самой турбины. Одной из таких зависимостей является формула геометрического подобия:

$$\frac{r_j}{R} = 0,68 \cdot (n_j \cdot \eta_{jm})^{-\frac{1}{2}} \cdot L, \quad (3.6)$$

где  $R$  – радиус колеса турбины, м;  $r_j$  – радиус лопасти на ободе колеса, м;  $n_j$  – количество сопл;  $\eta_{jm}$  – КПД гидроагрегата.

Формулу геометрического подобия используют при оптимизации конструкции турбины. На практике используются колеса с размером лопасти  $r < R/10$ . При большем размере лопастей ухудшаются условия их обтекания струями воды из-за взаимного влияния их друг на друга. Частота вращения колеса турбины должна быть согласована с характеристиками электрогенератора: обычно переменное напряжение на выходе генератора не превышает 400 В.

### 3.4. Перспективы развития малой гидроэнергетики на территории РТ

Наиболее подготовлена к широкомасштабной реализации в условиях России малая гидроэнергетика (МГЭ). Для обоснования перспектив развития МГЭ требуется разработка методик по оценке основных категорий ее энергетического потенциала. К источникам МГЭ относят:

- 1) естественные открытые водотоки и водохранилища;
- 2) искусственные водохозяйственные системы различного назначения (водохранилища, ирригационные каналы, промышленные объекты, использующие в своем цикле относительно большие объемы воды, т.е. крупные ТЭС, ГРЭС и т.д.). Энергетический потенциал МГЭ может быть использован как с помощью традиционных плотинных, деривационных и смешанных схем создания напора ( $\leq 0,5$  м) малых ГЭС (МГЭС), так и нетрадиционных технических решений. Например, с помощью бесплотинных или свободнопоточных (поверхностных или погружных) МГЭС, использующих в основном кинетическую энергию водного потока.

На практике могут быть реализованы передвижные или переносные МГЭС. Например, сезонное использование передвижных обратных гидроаг-

регатов на водотоке (турбинный режим во время паводка или половодья и насосный режим в меженный период), применение водоподъемных установок (турбина, использующая кинетическую энергию потока, соединенная валом с насосом) [5].

Проблема обеспечения электрической энергией отдельных и труднодоступных участков территории Республики Татарстан (РТ) в определенной мере может быть решена с помощью малой гидроэнергетики. Помимо решения энергетических проблем промышленных и сельскохозяйственных предприятий малая гидроэнергетика способствует также решению экологических задач. В первую очередь это касается частичного регулирования стока малых рек и может способствовать их восстановлению, препятствовать пересыханию таких рек и даже нередко наблюдаемой полной деградации речной сети.

В НПО «Ранд» разработаны малые ГЭС и микроГЭС мощностью от 6–20 кВт до 3 МВт в интервале напоров 3–80 м.

АОЗТ «МИТО ИНСЭТ» предлагает деривационные микроГЭС мощностью 10 и 50 кВт с диаметром напорного трубопровода 300 и 600 мм соответственно. Разработаны микроГЭС с пропеллерными турбинами и мощностью 7,5–90,0 кВт. МикроГЭС с диагональными турбинами имеют мощность до 100 кВт при напоре  $\leq 55$  м. Данная организация для малых ГЭС также выпускает осевые, пропеллерные и ковшовые гидротурбины.

Фирма «МАГИ» разработала прямоточную трубную гидротурбину мощностью 50–90 кВт при напоре 6–12 м.

### Контрольные вопросы

1. Каковы источники потенциала малой и традиционной гидроэнергетики?
2. Что такое геометрический (или полный) напор  $H_t$  и рабочий (или располагаемый) напор  $H_a$ ?
3. Каким напором определяется мощность натекающего на активную турбину потока?
4. Какие методы измерения расхода воды  $Q$  используются на практике?
5. Почему характеристики рек, используемые для уяснения возможности эксплуатации малых и микроГЭС, получают для межени?
6. Каковы основные направления развития малой гидроэнергетики в Европейской части России?
7. Определение активной и реактивной гидротурбин и основное отличие принципа их работы.
8. Разъясните принципы работы ГЭС и ГАЭС.

9. На каких реках целесообразно эксплуатировать каскады ГЭС?
10. Определение коэффициента быстроходности  $L$  в гидроэнергетике. Выполните анализ формул для коэффициента быстроходности.
11. Размер колеса активной гидротурбины и его угловая скорость.
12. Сформулируйте конструктивные особенности отечественных и зарубежных реактивных турбин.
13. Назовите основные технические характеристики современных типов деривационных микроГЭС.
14. Каковы требования к гидрологическим параметрам створов малых рек для размещения бесплотинных, свободнопоточных и гирляндных микроГЭС?
15. Разъясните модель технологического процесса низконапорной ГЭС.
16. Выполните анализ формулы для мощности малой ГЭС.

## Глава 4. БИОЭНЕРГЕТИКА

### 4.1. Введение

В биоэнергетике основное внимание уделяется производству биотоплива, анаэробному сбраживанию отходов растительного и животного происхождения, использованию древесины в экологических чистых ТЭЦ и твердых бытовых отходов для получения электрической и тепловой энергии.

Выращивание и переработка однолетнего травянистого растения рапса дает возможность получить корм для сельскохозяйственных животных, пищевое и техническое масло (в семенах 33–50 %) и дизельное топливо.

На основе спиртовой ферментации можно получить этиловый спирт (этанол)  $C_2H_5OH$ . Этанол – летучее жидкое топливо, которое можно использовать вместо бензина или в качестве добавки к бензину с целью решения экологических проблем. Отметим следующие процессы производства этанола из различных культур в порядке возрастания трудностей переработки: 1) непосредственно из сахарного тростника; 2) из сахарной свеклы; 3) из растительного крахмала (например, из злаковых) и 4) из целлюлозы. Основа рентабельности получения этанола – использование различных видов отходов биомассы для выработки электроэнергии и обеспечения производства теплом.

Можно вводить в измененные бензиновые двигатели 95%-ный этанол и в обычный двигатель со специальным карбюратором смесь (газохол) 100%-ного этанола (обезвоженный) с бензином в соотношении 1:10. Обезвоженный этанол – жидкость в интервале  $T = -117...+78$  °С с температурой воспламенения 423 °С. Экспериментально показано, что двигатели потребляют примерно равное количество бензина и газохола. В ближайшее время в Татарстане будет освоено промышленное производство этанола.

Биогазовые технологии при их комплексной экономической оценке с учетом требований российского рынка становятся высокорентабельными. Биометаногенерация органических веществ позволяет получить биогаз (0,5–0,8 метана – 0,2–0,5  $CO_2$ ) и высококачественные органические удобрения. Например, решение этих задач можно осуществить на отечественной установке НБГУ–1 со сроком окупаемости 0,5 года. Установка может ежедневно перерабатывать 600 кг отходов с влажностью 85 %.

### 4.2. Получение биогаза в биогазогенераторах (БГГ)

Полное разложение биомассы происходит под действием аэробных и анаэробных бактерий. 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. За счет их деятельности углерод делится между полностью окисленным  $\text{CO}_2$  и полностью восстановленным  $\text{CH}_4$ . Для процессов, идущих в анаэробных условиях, предпочитают термин «брожение» или «сбраживание».

Основное уравнение, описывающее анаэробное сбраживание (на примере целлюлозы), имеет вид



Эта реакция слабо экзотермичная, т. е. протекает с выделением небольшого количества тепла (1,5 МДж на 1 кг сухой массы).

Полученная смесь  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  является конечным продуктом разложения сложных органических веществ микроорганизмами в анаэробных условиях и называется биогазом. На 50÷80 % он состоит из метана и на 50÷20 % из углекислого газа.

При получении газа в БГГ энергия солнца преобразуется в доступное, удобное для технического использования топливо и химическое сырье. При этом в отработанных отходах установки содержится значительно меньше болезнетворных организмов, чем в исходном материале.

Биохимические процессы при сбраживании в БГГ идут в три стадии, причем каждая обеспечивается собственной группой анаэробных бактерий:

1. Нерастворимые разлагаемые биологически материалы (жиры, полисахариды) расщепляются на углеводы и жирные кислоты:  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 1$  сутки.

2. Кислотопродуцирующие бактерии образуют преимущественно уксусную и пропионовую кислоты:  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 1$  сутки.

3. Бактерии, образующие метан, полностью сбраживают исходные продукты:  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 14$  суток. Метанообразующие бактерии чувствительны к величине рН, которая должна находиться в интервале от 6,6 до 7,0, обеспечивая среднекислую среду.

Возможный энергетический выход установки на биогаз определяется соотношением

$$E = \eta \cdot H_b \cdot V_b, \quad (4.2)$$

где  $\eta$  – КПД горелочного устройства, котла и т.д. (около 60 %). Поскольку некоторое количество сгорающего метана идет на подогрев  $\text{CO}_2$ , входящего в биогаз, то КПД устройства снижается;  $H_b$  – теплота сгорания на единицу

объема биогаза (удельная объемная теплота сгорания), МДж/м<sup>3</sup>;  $V_b$  – объем получаемого биогаза, м<sup>3</sup>/сут.

Для чистого метана формула (4.2) примет вид

$$E = \eta \cdot H_m \cdot f_m \cdot V_b, \quad (4.3)$$

где  $H_m$  – удельная теплота сгорания метана (при н.у. 28 МДж/м<sup>3</sup>);  $f_m$  – доля метана в биогазе (около 0,7).

Объем биогаза определяется из уравнения

$$V_b = c \cdot m_o, \quad (4.4)$$

где  $c$  – выход биогаза из сухой биомассы (от 0,2 до 0,4 м<sup>3</sup>/кг);  $m_o$  – масса сухого сбраживаемого материала (например, 2 кг/сут на одну корову).

Объем жидкой массы, заполняющей БГГ, равен:

$$V_f = m_o / \rho_m, \quad (4.5)$$

где  $\rho_m$  – плотность сухого материала, распределенного в массе (около 50 кг/м<sup>3</sup>).

Объем самого БГГ определяется выражением

$$V_d = \dot{V}_f \cdot t_r, \quad (4.6)$$

где  $\dot{V}_f$  – скорость подачи сбраживаемой массы в генератор;  $t_r$  – время пребывания очередной порции в генераторе (от 8 до 20 сут).

Для успешного сбраживания необходимо поддержание постоянных условий по температуре и подаче исходных материалов. Для определения видов бактерий существуют следующие характерные уровни температур: 1 – психрофилический, около 20 °С, 2 – мезофилический (~30 °С) и 3 – термофилический (~55 °С). При этом сбраживание при более высоких температурах идет быстрее, чем при низких, и характеризуется удвоением выхода газа на каждые 5 °С.

Полученный биогаз можно использовать как топливо не только для получения теплоты, но и для автомобильных, тракторных и газовых двигателей с целью получения электроэнергии. Сжигание 1 м<sup>3</sup> биогаза в таких двигателях может дать 1,0÷1,5 кВт·ч электроэнергии.

Определим объем биогаза, получаемого с помощью БГГ, утилизирующего навоз 4 коров, объем БГГ и обеспечиваемую им мощность. Время цикла

сбраживания 20 суток, температура 30 °С, подача сухого сбраживаемого материала от одного животного идет со скоростью 2 кг/сут, выход биогаза составляет 0,24 м<sup>3</sup>/кг, эффективность горелочного устройства 0,6, содержание метана в биогазе 0,8.

Примем  $c = 0,24 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\rho_m = 50 \text{ кг/м}^3$ ;  $H_m = 28 \text{ МДж/сут}$ .

$m_o = 4 \cdot 2 \text{ кг/сут} = 8 \text{ кг/сут}$ .

Согласно (4.4)

$$V_b = 0,24 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 8 \text{ кг/сут} = 1,92 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Объем жидкой массы составит:

$$V_f = 8 \text{ кг/сут} : 50 \text{ кг/м}^3 = 0,16 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

С учетом (4.6) объем БГГ равен:

$$V_d = 0,16 \text{ м}^3/\text{сут} \cdot 20 \text{ сут} = 3,2 \text{ м}^3.$$

Согласно (4.3)

$$\begin{aligned} E &= 0,6 \cdot 28 \text{ МДж/м}^3 \cdot 0,8 \cdot 1,92 \text{ м}^3/\text{сут} = 26 \text{ МДж/сут} = \\ &= 7,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут} = 300 \text{ Вт (непрерывно, тепловая)}. \end{aligned}$$

### 4.3. Биогазовые установки

Автономный биогазоэнергетический модуль БИОЭН–1 предназначен для безотходной экологически чистой переработки органических отходов сельскохозяйственного производства (навоза, помета, твердых бытовых отходов, растительных остатков) в газообразное топливо – биогаз, конвертируемый далее в электрическую и тепловую энергию и экологически чистые органические удобрения.

В состав оборудования входят два биореактора – метантенка (по 5 м<sup>3</sup>), газгольдер мокрого типа на 12 м<sup>3</sup> и по желанию заказчика модуль комплектуется биогазовым теплогенератором (23 кВт) и электрогенератором (4 кВт), бытовой конфорочной биогазовой плитой, инфракрасными горелками на биогазе мощностью 5 кВт (рис. 4.1).

Площадь помещения, отапливаемого БИОЭН–1, составляет 150–200 м<sup>2</sup>. Суточное количество перерабатываемых отходов при влажности 85 % до 1 тонны. Количество вырабатываемого биогаза (60 % метана) до 40 м<sup>3</sup>/сут. Количество вырабатываемой электроэнергии до 80 кВт·ч/сут, тепловой энергии до 230 кВт·ч/сут. Количество вырабатываемых органических удобрений до 1 т/сут. Срок эксплуатации не менее 10 лет. БИОЭН–1 может собираться в батареи из 2, 3, 4 комплектов.

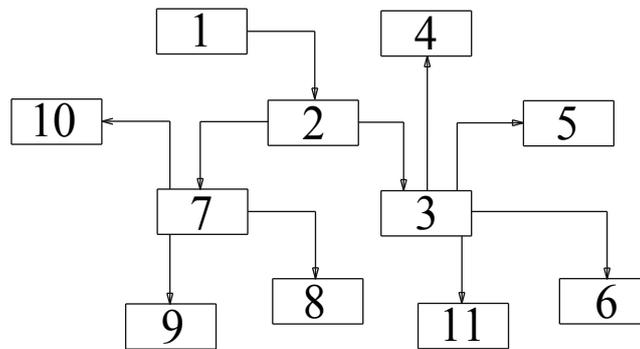


Рис. 4.1. Схема биоэнергетического блок-модуля БИОЭН-1:  
 1 – ферма; 2 – биореактор-метантенк, 2 шт. по  $5 \text{ м}^3$ ; 3 – газгольдер; 4 – теплогенератор (АОГВ-23 кВт), теплоэнергия  $230 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}$ ; 5 – биогазогенератор (4 кВт),  $80 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}$ ; 6 – ИК-беспламенная горелка, 5 кВт; 7 – хранилище удобрений на 1 т/сут; 8 – внесение 1–3 т/га удобрений в почву, разведение водой в 20 раз; 9 – фасовка для розничной торговли по 5–10 л; 10 – дождевание удобрениями, разведенными водой в 50–70 раз; 11 – бытовая газовая плита

Разработана биогазовая установка БГУ-500 для безотходной переработки навоза крупного рогатого скота (КРС) с получением биогаза. БГУ-500 имеет следующие характеристики: может перерабатывать навоз ферм КРС на  $\geq 500$  голов; количество и объем реакторов –  $4 \times 125 \text{ м}^3$ ; вид перерабатываемого сырья – навоз КРС; производительность по исходному навозу:  $40 \text{ т/сут}$ ; общий выход биогаза –  $400 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

#### 4.4. Виды биомассы

Жизнедеятельность биоценозов (греч. bios – жизнь, koinos – общий, совокупность растений, грибов, животных и микроорганизмов, населяющих тот или иной однородный участок суши или водоема и характеризующихся определенными отношениями между собой и приспособленностью к условиям окружающей среды) на поверхности земли приводит к образованию биомассы различных видов. В энергетических целях могут быть использованы: торф, дрова, древесные отходы лесозаготовительных и деревоперерабатывающих предприятий, сельскохозяйственные отходы и ТБО.

Биомасса – один из наиболее мощных природных аккумуляторов солнечной энергии. Первичным источником биомассы является фотосинтез, т. е. процесс образования органических веществ и аккумуляции химической энергии под действием солнечного излучения. Основа биомассы – органические соединения углерода, которые при соединении с кислородом выделяют тепло. Чистая энергия, которую можно получить при сжигании, лежит в диа-

пазоне от 10 ГДж/т (сырая древесина) до 40 ГДж/т (нефтеподобные вещества, жиры).

В настоящее время биомасса обеспечивает от 6 до 13 % всех мировых энергетических потребителей, что составляет примерно 1 млн т нефти в сутки. Возобновляемость биомассы позволяет получать непрерывный выход энергии. Недостатком использования биомассы является значительное содержание в ней влаги, что снижает полезный выход энергии. Выделяют относительную и абсолютную влажности биомассы.

Абсолютная влажность, т. е. влагосодержание по сухому основанию:

$$W_a = (m - m_0)/m_0 \cdot 100 \%, \quad (4.7)$$

где  $m$  – общая масса биомассы;  $m_0$  – масса биомассы в обезвоженном состоянии.

Относительная влажность, т. е. влагосодержание по сырому основанию:

$$W_o = (m - m_0)/m \cdot 100 \%. \quad (4.8)$$

В момент сбора относительная влажность биомассы может оказаться значительной: древесина – 65 %, торф – 60÷70 %, водоросли – 90 %.

#### 4.5. Характеристики древесного топлива

Практически важными для энергетического использования являются лесные биоценозы. Создаваемая ими концентрация биомассы делает технически возможным и экономически выгодным использование ее в качестве биотоплива. Древесина является ценным сырьем. Помимо доступности, низкой стоимости, уникальности физико-механических, технологических и других свойств, она обладает ценными экологическими качествами. Древесные продукты и отходы разлагаются в естественном кругообороте и не представляют опасности для здоровья людей.

Расчет годового количества древесного топлива, которое может быть использовано в энергетике, проводится по формуле

$$V_{\text{год}} = (V_{\text{расч.л}} - V_{\text{дел.др}}) + (V_{\text{руб.ух}} - V_{\text{дел.руб.ух}}) + (V_{\text{общ.древ.отх}} - V_{\text{древ.отх.пр}}), \quad (4.9)$$

где  $V_{\text{расч.л}}$  – объем расчетной лесосеки (количество древесины, которое планируется вырубить),  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{дел.др}}$  – объем деловой древесины (древесина, входящая в состав ликвидной массы, идущая на производство),  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{руб.ух}}$  – объем рубки ухода (древесина, образующаяся в результате санитарного ухода за лесом (сруб сухостоя)),  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{дел.руб.ух}}$  – объем деловой рубки ухода (часть

санитарной рубки ухода, которая может быть использована в производстве),  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{общ.древ.отх}}$  – общий объем древесных отходов, образующийся в результате лесозаготовки, лесопиления и деревообработки (ветви, сучья, кора, опилки и т.д.),  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{древ.отх.пр}}$  – объем древесных отходов, используемых в производстве,  $\text{м}^3$ .

Для примера оценим годовое количество древесного топлива Нижнекамского лесхоза.

Данные Департамента лесного хозяйства РТ на 2001 год составили:

$$V_{\text{расч.л}} = 84600 \text{ м}^3; V_{\text{дел.др}} = 2882,7 \text{ м}^3; V_{\text{руб.ух}} = 10973 \text{ м}^3; V_{\text{дел.руб.ух}} = 1340 \text{ м}^3; V_{\text{общ.древ.отх}} = 615 \text{ м}^3; V_{\text{древ.отх.пр}} = 109 \text{ м}^3.$$

По формуле (4.9):

$$V_{\text{год}} = (84600 - 2882,7) + (10973 - 1340) + (615 - 109) = 91856,3 \text{ м}^3.$$

Выделяют различные фракции лесной биомассы: стволовая древесина, крона, сучья, корни, кора, валежник и сухостой.

В зависимости от влажности стволовая древесина бывает:

- мокрая – древесина, длительное время находящаяся в воде;
- свежесрубленная – древесина, сохранившая влагу растущего дерева (33÷50 % влажности);
- воздушно-сухая – древесина, выдержанная длительное время на открытом воздухе (13÷17 %);
- комнатно-сухая – древесина, длительное время находящаяся в отапливаемом и вентилируемом помещении (7÷11 %);
- абсолютно-сухая – древесина, высушенная при температуре  $t = 103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  до постоянной массы.

Основной энергетической характеристикой топлива является его теплотворная способность. Высшей теплотворной способностью на сухую биомассу  $Q_{\text{в}}$ , МДж/кг (ккал/кг), называется теплотворная способность топлива в абсолютно сухом состоянии. Расчет удельной высшей теплотворной способности топлива (на единицу массы, ккал/кг или объема) осуществляется по формуле

$$Q_{\text{в}} = 81 \cdot C + 300 \cdot H - 26 \cdot (O - S), \quad (4.10)$$

где  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $S$  – процентное содержание углерода, водорода, кислорода и серы в абсолютно сухой биомассе.

Удельная высшая теплотворная способность топлива является наиболее стабильной энергетической характеристикой, так как стабилен элементарный химический состав биомассы деревьев. Результаты, полученные по формуле (4.10), отличаются от экспериментальных на 1÷2 %. Большинство традици-

онных видов древесного топлива имеют низкую удельную теплотворную способность.

Удельный валовый (теоретический) потенциал энергии абсолютно сухой биомассы определяется по формуле

$$e = b \cdot Q_{\text{в}}, \quad (4.11)$$

где  $b$  – плотность сухой древесины ствола,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

#### 4.6. Оборудование для переработки древесного топлива

Газогенераторная печь – калорифер (ГГПК) предназначена для обогрева помещений, приготовления пищи и сушки пищевых продуктов. В ГГПК применяется принцип газогенерации, т. е. дожигания газообразных продуктов, образующихся при тлении твердого топлива (например, древесного). ГГПК выпускаются пяти типов в зависимости от объема обогреваемого помещения (100, 200, 300, 400, 500  $\text{м}^3$ ). Время работы ГГПК 1-5 равно 8–12 ч.

В термохимическом газогенераторе в результате термической переработки из биомассы (древесные отходы) получается газообразное топливо (ГТ), в основном свободное от примесей пиролизных смол и кислот. ГТ можно использовать для сжигания в двигателях внутреннего сгорания с получением электроэнергии, в топках водогрейных котлов и т.д. 8,5  $\text{м}^3$  ГТ эквивалентно 1 кг мазута.

Газогенератор УТГ-600 предназначен для термохимической переработки торфа, бурых углей, лесоперерабатывающих, сельскохозяйственных и бытовых отходов в горючий газ (ГГ). ГГ может быть использован в качестве топлива в любых энергетических установках. Высокая калорийность ГГ обеспечивается при влажности сырья 28–30 вес. %. Номинальная мощность установки 600 кВт.

#### 4.7. Эффективность малых ТЭС на древесном топливе в РТ

Анализ эффективности вклада малых ТЭС на древесном топливе в энергетический баланс районов Республики Татарстан (РТ) включает: 1. Уяснение объемных характеристик и энергетической эффективности стволовой древесины, коры, сухостоя и др. 2. Определение годового количества и комплексную оценку технического потенциала ДТ в лесхозах республики, на лесопильных и деревообрабатывающих производствах. 3. Оценку потребления тепловой и электрической энергии на деревообрабатывающих производствах, в лесхозах и прилегающих к ним пунктах и уяснение целесообразности внедрения технологий энергетического использования ДТ.

4. Представление основных энергетических и эксплуатационных характеристик различных газогенераторных электростанций. 5. Исследование совместной эксплуатации газогенератора и дизельного агрегата и работы дизеля на генераторном газе. 6. Представление технологической схемы газогенераторной установки, электрической части, схемы электрических соединений, компоновки и молниезащиты проектируемой станции. 7. Изучение энергетической и экономической эффективности создания относительно экологически чистых малых ТЭС на ДТ в условиях различных районов.

Результаты исследования свидетельствуют о наличии значительного количества ДТ на территории республики. Наибольшие запасы леса имеются у Агрызского, Билярского, Заинского, Камского, Лаишевского, Мензелинского, Нижнекамского, Нурлатского, Пригородного и Сабинского лесхозов. Отношение запасов леса к расчетной лесосеке характеризуется величиной  $> 100$ . Для автономного снабжения энергией потребителя в России разработан газогенерирующий газодизельный модуль на ДТ. В крупных лесхозах могут быть использованы от 1 до 4 таких модулей. Во всех лесхозах, кроме Альметьевского и Зеленодольского, возможно покрытие потребностей в электроэнергии путем ее производства на собственных древесных отходах. В лесхозах с максимальной мощностью менее 300 кВт целесообразно устанавливать модули с регулируемой мощностью 100–300 кВт. Использование ДТ в Татарстане позволит вырабатывать в год  $\geq 800$  млн кВт·ч электроэнергии в зависимости от сортов и влажности древесины с применением газогенераторной дизельной электрической станции.

Например, для районов со среднегодовым объемом  $V_{\text{ДТ}} = 35000 \text{ м}^3$  мощность проектируемой станции составляет 1400 кВт. Отдано предпочтение работе двигателя в режиме газодизеля как наиболее простому в технической реализации и обеспечивающему полную автономность от источников энергоснабжения при запуске газогенератора.

Применение малых ТЭС на древесном топливе в РТ позволит решить проблему утилизации древесных отходов, экономить ископаемые природные ресурсы и сохранить экологический баланс территории.

#### **4.8. Особенности применения ТБО в энергетике**

Термин «биомасса» охватывает твердые бытовые отходы (ТБО) городов. 10 % ежегодно образующихся ТБО в мире подвергается инженерно-технической переработке, 90 % ТБО сбрасываются в мусорные отвалы на землях вокруг городов. Например, в Москве ежегодно выбрасывается до 10 млн  $\text{м}^3$  ТБО или 2,5 млн т по массе. Это приводит к отчуждению полезных земель. Поэтому была поставлена задача – создать технологию обработки

ТБО. Разработана экспресс-технология переработки в биореакторах органической части ТБО в биогаз и органические удобрения за 2–3 недели. Выход биогаза и метана на 1 т обработанных ТБО составил 374 и 253 м<sup>3</sup> соответственно. Выход органических удобрений (шлама) по сухому веществу достиг 16,4 %.

Расчеты показали, что при сжигании 1 т ТБО можно получить 1300–1700 кВт·ч тепловой энергии или 300–550 кВт·ч электроэнергии. Намечалась тенденция по повышению теплотехнических характеристик ТБО с последующим использованием их для выработки электроэнергии. Однако низкие параметры пара на отечественных мусоросжигательных заводах ( $G = 15\text{--}35$  т/ч,  $P = 16$  ата,  $T = 240$  °С), существенно снижают удельные показатели по выработке электроэнергии по сравнению с паровыми электростанциями ( $G = 640$  т/ч,  $P = 140$  ата,  $T = 540$  °С). Повышение эффективности применения ТБО можно достигнуть за счет частичного замещения энергетического топлива бытовыми отходами. При сжигании на ТЭС природного газа целесообразно использовать установку для газификации ТБО с последующей очисткой полученного газа и сжиганием его в топках котлов, работающих на природном газе.

### Контрольные вопросы

1. Каковы основные направления развития биоэнергетики в России?
2. Что такое биомасса?
3. Какие виды биотоплива используют на практике?
4. Назовите пищевые и технические продукты, которые могут быть получены на основе переработки семян рапса.
5. Что такое биогаз и каковы способы его получения?
6. Какие типы биореакторов используются на практике?
7. Сформулируйте основные этапы получения водорода с помощью фотобиореактора.
8. Раскройте особенности использования основных видов биотоплива (например, биогаза, древесного топлива, этанола и др.) в центральных и южных районах России.
9. Объясните методику расчета энергетического выхода биогазогенераторов.
10. Каковы три стадии анаэробного сбраживания?
11. Какие факторы влияют на эффективность работы биогазогенераторов?
12. Что такое автоматизированный биогазогенератор?
13. Объясните выражение:  $E = \eta H_m f_m V_b$ , раскройте смысл и размерность входящих в него параметров.

14. Объясните энергетическую эффективность автоматизированного биогазоэнергетического модуля БИОЭН-1.

15. Почему биогазовые установки при их комплексной экономической оценке с учетом требований российского рынка являются высококоррентабельными?

16. Объясните практическую важность энергетического использования древесного топлива.

17. Сформулируйте методику расчета годового количества древесного топлива в лесхозах, которое может быть использовано в энергетике.

18. Напишите выражение для определения удельного валового потенциала энергии абсолютно сухой биомассы.

19. Раскройте понятие экологически чистых ТЭС на древесном топливе.

20. Какова возможность применения древесины, отходов лесозаготовок и деревообрабатывающей промышленности в производстве тепловой и электрической энергии?

21. Каковы ресурсы древесины на территории Российской Федерации?

22. Определите на примере лесхоза с запасом древесины 35 тыс. м<sup>3</sup> возможное количество древесного топлива для энергетических целей.

23. Сформулируйте перспективы использования газогенераторных электростанций на древесном топливе в условиях Среднего Поволжья.

24. Какими факторами определяется количество энергомодулей для обеспечения максимальной мощности электрических станций для лесхозов с различными запасами леса?

25. По какому выражению оценивается энергетический потенциал древесного топлива?

26. Объясните экономический эффект от эксплуатации ТЭС на древесном топливе в Среднем Поволжье.

27. Назовите типы ТЭС на древесном топливе. Раскройте их особенности.

28. Какова ожидаемая выработка электроэнергии ТЭС на древесном топливе в условиях Татарстана?

29. Каковы конструктивные особенности отечественного оборудования для переработки древесного топлива?

30. Сформулируйте особенности применения твердых бытовых отходов в энергетике.

31. С какой целью используются экспресс-технология переработки в БГГ органической части твердых бытовых отходов и газификация ТБО?

32. Какова методика повышения эффективности применения ТБО в тепловых электростанциях?

## Глава 5. ГЕЛИОЭНЕРГЕТИКА

### 5.1. Нагревание солнечным излучением воды и воздуха

Солнечная энергия используется в нагревателях воды и воздуха, солнечных дистилляторах, зерносушилках, солнечных энергетических установках башенного типа и других устройствах. Расширяется производство солнечных нагревательных систем для обеспечения промышленности и сельскохозяйственного производства большим количеством горячей воды. Недорогие нагреватели типа открытой емкости позволяют нагревать воду до температуры  $T_{ж} \approx 31$  °С. Параметры нагревателя ограничены увеличением тепловых потерь с ростом скорости ветра. Материал, из которого изготовлен резервуар, должен быть черного цвета или иметь черное покрытие. Для защиты приемника от ветра его помещают в контейнер с прозрачной для солнечной радиации (СР) крышкой.

Поверхность приемника поглощает поток СР, равный  $\tau_{\text{покр}} \cdot \alpha_{\text{пр}} \cdot A_{\text{пр}} \cdot G$ . Здесь  $G$  – поток суммарной радиации, поступающий на единичную поверхность приемника;  $A_{\text{пр}}$  – площадь освещенной поверхности;  $\alpha_{\text{пр}}$  – коэффициент поглощения приемной поверхности;  $\tau_{\text{покр}}$  – коэффициент пропускания прозрачного покрытия, защищающего приемную поверхность от ветра.

Из-за поглощения СР температура приемника  $T_{\text{пр}}$  повышается по сравнению с температурой окружающей среды  $T_a$ . При этом возникает теплоотдача от приемника со скоростью  $(T_{\text{пр}} - T_a)/R_T$ , где  $R_T$  – полное термическое сопротивление тепловым потерям. Фактический тепловой поток, поступающий на приемную поверхность, описывается балансом

$$P_{\text{ф}} = \tau_{\text{покр}} \cdot \alpha_{\text{пр}} \cdot A_{\text{пр}} \cdot G - [(T_{\text{пр}} - T_a)/R_T] = \eta_{\text{захв}} \cdot A_{\text{пр}} \cdot G, \quad (5.1)$$

где  $\eta_{\text{захв}} < 1$  – коэффициент захвата излучения.

Поток тепла от приемника к теплоносителю при заданной величине  $G$  определяется выражением вида

$$P = \eta_{\text{пр.тепл}} \cdot P_{\text{ф}}, \quad (5.2a)$$

где  $\eta_{\text{пр.тепл}}$  – коэффициент теплопередачи, характеризующий долю потока  $P_{\text{ф}}$ , передаваемую теплоносителю. Для качественных приемников величина  $\eta_{\text{пр.тепл}}$  лишь немного меньше единицы.

При нагревании статической массы жидкости

$$P = mc \frac{dT_f}{dt}, \quad (5.2б)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость теплоносителя при постоянном давлении.

При нагревании в приемнике теплоносителя с массовым расходом  $\dot{m}$  поток тепла  $P$  определяется по формуле

$$P = \dot{m} c (T_2 - T_1), \quad (5.2в)$$

где  $T_1$  – температура входящего в приемник теплоносителя,  $T_2$  – выходящего.

Для оценки параметров нагревателя необходимо иметь корректную информацию о характеристиках солнечного излучения и температуре окружающей среды.

Тепловой баланс открытой черной емкости (черный резервуар с изолированным от земли дном и без контейнера со стеклянной крышкой) описывается выражением вида

$$m \cdot c \frac{dT_{\text{ж}}}{dt} = \alpha_{\text{пр}} \cdot A_{\text{пр}} \cdot G - (T_{\text{пр}} - T_a) / R_T, \quad (5.3)$$

где  $m$  – масса теплоносителя. Прямоугольная черная резиновая емкость, размеры которой  $1 \times 1 \times 0,1$  м, содержит 100 л воды;  $c$  – удельная теплоемкость воды, равная  $4200$  Дж/(кг·К); производная  $dT_{\text{ж}}/dt$  характеризует изменение температуры теплоносителя по времени;  $\alpha_{\text{пр}} = 0,9$ ; для рассматриваемого приемника  $R_T = 0,015$  К/Вт.

Солнечный нагреватель воды характеризуется тремя эксплуатационными параметрами: 1) полным термическим сопротивлением  $R_T$ ; чем больше  $R_T$ , тем выше качество приемника. Если  $R_T = 0,015$  и  $0,120$  К/Вт, температура теплоносителя соответственно равна  $\sim 31$  и  $\sim 90$  °С. Полное термическое сопротивление обусловлено конвективными и радиационными потерями; 2) максимальной средней температурой теплоносителя  $T_{\text{ж}}^{\text{max}}$ . Аналитическое выражение  $T_{\text{ж}}^{\text{max}}$  получается из уравнения теплового баланса для открытого черного приемника при использовании условия  $dT_{\text{ж}}/dt = 0$ ; 3) временем  $t$ , ч, достижения максимальной средней температуры. Для оценки  $t$  из уравнения теплового баланса определяют  $dT_{\text{ж}}/dt$ . При этом используется гарантированная средняя температура  $\bar{T}_T = 0,5(T_{\text{пр}} + T_a)$ . Далее рассчитывают величину  $t = \frac{\Delta T}{dT_{\text{ж}}/dt}$ . Здесь  $\Delta T$  – разность температур приемника и окружающей среды.

Приемники сложной конструкции нагревают за определённое время небольшие объемы воды. Затем нагретая жидкость перекачивается в изоли-

рованный резервуар, что позволяет уменьшить теплотери системы. Резервуары объемом 100–200 л для домашнего хозяйства удовлетворяют суточную потребность в горячей воде.

Обычно приемник с селективной поверхностью поглощает максимум энергии СР на длине волны  $\lambda = 0,5$  мкм. Максимум энергии, излучаемой приемником, соответствует длине волны 10 мкм. Идеальная селективная поверхность, изготовленная из полупроводникового материала, характеризуется большим монохроматическим коэффициентом поглощения  $\alpha_\lambda$  при  $\lambda \sim 0,5$  мкм и низким монохроматическим коэффициентом излучения  $\varepsilon_\lambda$  при  $\lambda \sim 10$  мкм. Следовательно, для селективной поверхности выполняется условие  $\alpha_\lambda \gg \varepsilon_\lambda$ . Лучшим способом повышения температуры теплоносителя является вакуумирование пространства между приемной поверхностью и ее стеклянной крышкой.

Энергию СР можно использовать для подогрева воздуха, просушивания зерна и обогрева здания. В таких устройствах воздух нагревается путем контакта с поглощающей СР поверхностью. Воздушные нагреватели обычно изготавливаются с поверхностями, имеющими канавки для увеличения контактной поверхности и усиления турбулентности, необходимой для теплопередачи в воздухе. Энергию, передаваемую воздуху от поглощающей поверхности в единицу времени, можно оценить по формуле

$$E_v = \rho \cdot c \cdot k (T_2 - T_1), \quad (5.4)$$

где  $k$  – объемный расход воздуха;  $\rho = 1,15$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха и  $c = 1,0$  кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> – теплоемкость воздуха при постоянном давлении и средней температуре для умеренных разностей температур.

Анализ теплопереноса в первом приближении можно выполнить с помощью соответствующих уравнений для теплового потока. При пропускании теплого воздуха через влажный материал он унесет с собой испаряемую влагу.

## 5.2. Солнечное тепловое оборудование

Отечественная промышленность выпускает плоский гидравлический коллектор (ПГК) и воздушный коллектор (ВК). Коллектор солнечный КМЗ может применяться в одно- и двухконтурных системах с естественной и принудительной циркуляцией теплоносителя. Коллекторы преобразуют прямую и рассеянную СР и устанавливаются стационарно.

Конструктивные особенности ПГК: производительность – 70 л горячей воды (50–60 °С) в день; ВК: теплоноситель – воздух, производительность – 60 м<sup>3</sup>/Г·М<sup>2</sup>.

Солнечный коллектор «Радуга-М» можно использовать для нагрева различных жидких теплоносителей, совместимых с материалом его поглощающей панели. Наружная поверхность поглощающей панели площадью  $1 \text{ м}^2$  имеет селективное покрытие ( $\alpha_{\text{пр}} \geq 0,92$ ). Степень черноты покрытия панели 0,11–0,14.

Солнечная водонагревательная установка «Радуга-2М» предназначена для эффективного нагрева воды и сохранения ее длительное время в мае – сентябре. Средняя температура нагрева воды в баке в летнее время: 40–60 °С. Время нагрева воды в баке ( $V = 200 \text{ л}$ ) от 15 до 50 °С в ясный солнечный день  $t = 6,0\text{--}6,5 \text{ ч}$ .

Солнечная водонагревательная установка на основе солнечного коллектора СК-01-44 предназначена для получения горячей воды ( $T_{\text{ж}}^{\text{max}} \leq 80 \text{ °С}$ ) с естественной или принудительной циркуляцией теплоносителя (воды) в системе. Минимальный блок включает 2 панели и 1 теплоизолированный бак на 160 л.

В солнечном коллекторе из нержавеющей стали параметры селективного покрытия ( $\alpha_{\text{пр}} \geq 0,92$ , степень черноты  $\geq 0,04$ ) обеспечивают минимум излучательной способности в области спектра, соответствующего собственному тепловому излучению.

НПО Машиностроения изготавливает солнечные тепловые панели (СТП) для сушильных камер. Температура и мощность СТП соответственно равны 200–210 °С и  $500 \text{ Вт/м}^2$ .

Гелиоустановка ГВУ-800 предназначена для получения горячей воды (с электронагревателем  $60 \pm 5 \text{ °С}$ ) на объектах АПК.

### Контрольные вопросы

1. Объясните общий подход получения уравнения теплового баланса.
2. Какие основные параметры характеризуют работу солнечных нагревателей воды?
3. Что такое полное термическое сопротивление солнечного приемника? Каковы особенности расчета этого параметра?
4. Объясните особенности методики оценки максимальной температуры и времени её достижения для открытого черного приемника.
5. Каковы способы повышения эффективности работы солнечных нагревателей воды?
6. Какие типы отечественного солнечного теплового оборудования целесообразно эксплуатировать в южных регионах и районах с умеренным климатом?

7. С какой целью на практике используется теплый воздух?
8. Каковы приемные поверхности нагревателей воздуха?
9. Что такое активные и пассивные солнечные системы?
10. Какие типы селективных поверхностей используются в солнечных нагревателях воды?
11. Сформулируйте основные конструктивные особенности солнечных зерносушилок.
12. Какие типы аккумуляторов тепловой энергии используются на практике?
13. Что такое домашний тепловой аккумулятор энергии?
14. Определение плотной энергии, запасенной в домашнем тепловом аккумуляторе.

## Глава 6. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

### 6.1. Введение

Преобразование солнечной энергии в электрическую является важнейшим направлением в решении энергетических, экономических, экологических и социальных проблем. Полупроводниковая фотоэнергетика (ПФЭ) является надежной, долговечной и экологически чистой и может быть использована для улучшения экологической обстановки в регионе.

Физической основой ПФЭ является фотовольтаический эффект в полупроводниках. Согласно классификации солнечных элементов (СЭ), понятие элемент с гетеропереходом применимо к структуре, в которой для получения потенциального барьера используется не менее двух полупроводниковых материалов с различной проводимостью. На рис. 6.1 показан анизотипный резкий гетерогенный  $p$ - $n$  – переход. Он назван анизотипным в силу того, что в его формировании участвуют полупроводники как  $p$ -, так и  $n$ -типов проводимости, и в то же время он считается резким, поскольку на границе раздела материалов их параметры изменяются весьма значительно. Существуют различные типы структур СЭ с гетеропереходом.

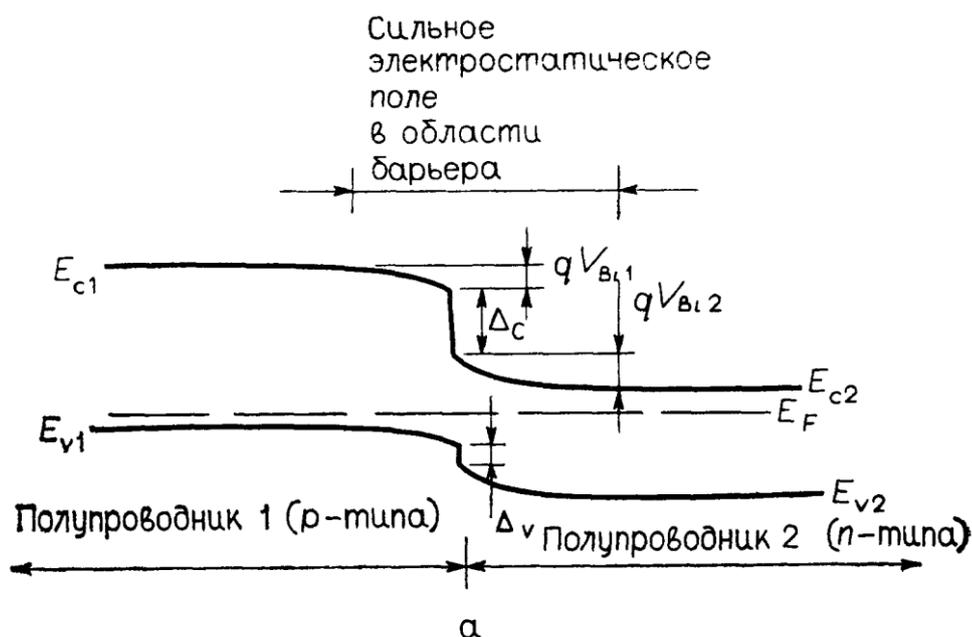


Рис. 6.1. Анизотипный резкий гетерогенный  $p$ - $n$ -переход

## 6.2. Поглощение фотонов

Основным процессом, к которому приводит поглощение квантов солнечной радиации в полупроводнике, является генерация электронно-дырочных пар. При поглощении фотонов с энергиями

$$h\nu \geq E_g$$

возможны прямые переходы электронов через запрещенную зону (постоянная Планка  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\nu$  – частота солнечного излучения;  $E_g$  – ширина запрещенной зоны; полупроводниковые материалы СЭ имеют  $E_g \sim 1$  эВ). Переходы, в которых одновременно с поглощением фотона происходит поглощение или испускание фонона, называются *непрямыми*. В этом случае

$$h\nu \pm h\Omega \geq E_g, \quad (6.1)$$

где энергия фононов  $h\Omega \sim 0,02$  эВ,  $\Omega$  – частота колебаний атомов в кристаллической решетке.

В случае прямых переходов через запрещенную зону полупроводники (например, GaAs) имеют резкую границу полосы поглощения ( $\nu > E_g/h$ ) (рис 6.2).

Для кремния граница полосы поглощения соответствует:

$$\nu > E_g / h \approx \frac{(1,1 \text{ эВ})(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot \text{эВ}^{-1})}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 0,27 \cdot 10^{15} \text{ Гц}, \quad (6.2)$$

$$\lambda \approx \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{0,27 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}} = 1,1 \text{ мкм}. \quad (6.3)$$

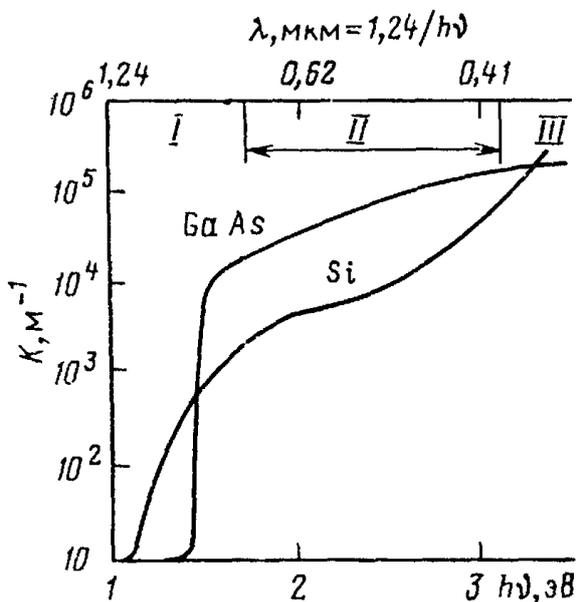


Рис. 6.2. Показатель экстинкции  $K$  материалов с прямыми (GaAs) и непрямыми (Si) переходами через запрещенную зону. Интенсивность излучения меняется по закону  $I(x) = I_0 \exp(-Kx)$ , где  $x$  – глубина проникновения излучения в материал. Зависимость изображена в логарифмическом масштабе, что маскирует резкую границу полосы поглощения: I – инфракрасный диапазон; II – видимый; III – ультрафиолетовый

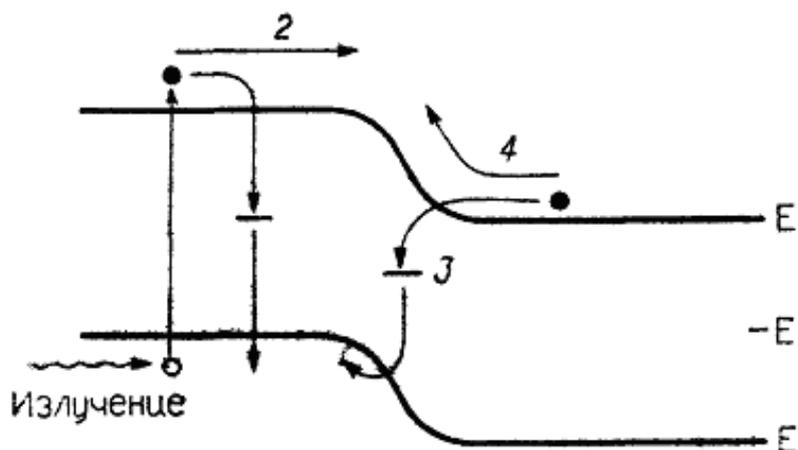


Рис. 6.3. Энергетическая зонная диаграмма солнечного элемента с  $p$ - $n$ -переходом, иллюстрирующая влияние рекомбинационных центров с энергетическими уровнями в середине запрещенной зоны на фототок

Фотогенерированные неосновные носители заряда, не достигнув перехода (рис. 6.3), могут вернуться в основное состояние (направление 1), если их захватывают рекомбинационные центры, что приводит к уменьшению фототока. Эти же центры способствуют увеличению прямого темнового диодного тока в направлении 3 и вызывают снижение напряжения холостого хода. В высококачественном монокристаллическом материале носители заряда перемещаются главным образом в направлениях 2 и 4.

Солнечное излучение характеризуется высокой плотностью потока фотонов ( $1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2} / [(2 \text{ эВ}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot \text{эВ}^{-1})] \sim 3 \cdot 10^{21} \text{ фотон} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Поглощение его полупроводниковыми материалами может резко увеличить скорость возникновения электронно-дырочных пар (в дополнение к термической генерации). Если генерация носителей происходит вблизи  $p$ - $n$ -перехода, то под действием поля вблизи барьера происходит пространственное разделение зарядов и возникает фотоЭДС, которая приводит к появлению тока в замкнутой внешней цепи (рис. 6.3).

Поглощающий фотоны  $p$ - $n$ -переход является источником постоянного тока (и энергии) с положительным полюсом в материале  $p$ -типа. Напряжение на контактах фотопреобразователя  $U_{\text{КФП}}$  будет меняться в зависимости от силы тока во внешней цепи  $I$  в пределах от 0 (условие короткого замыкания  $I_{\text{КЗ}}$ ) до  $U_{\text{ХХ}}$  (открытая цепь,  $I = 0$ ). Максимум энергии передается внешней нагрузке, если ее сопротивление  $R_{\text{н}}$  равняется внутреннему сопротивлению источника  $R_{\text{вн}}$ . Это сопротивление определяется потоком поглощаемых фотонов. Для хорошего энергетического согласования в солнечном элементе необходимо, чтобы  $R_{\text{н}}$  менялось в соответствии с облученностью.

Ток  $I$  солнечного элемента определяется вычитанием индуцированного фотонами тока  $I_C$  из темнового тока  $I_T$  фотодиода (рис. 6.4). При обратном смещении  $I_T$  отрицателен и равен термически генерируемому току  $I_T$ . Токи  $I_T$  и  $I_C$  складываются, так как они оба возрастают при генерации электронно-дырочных пар.

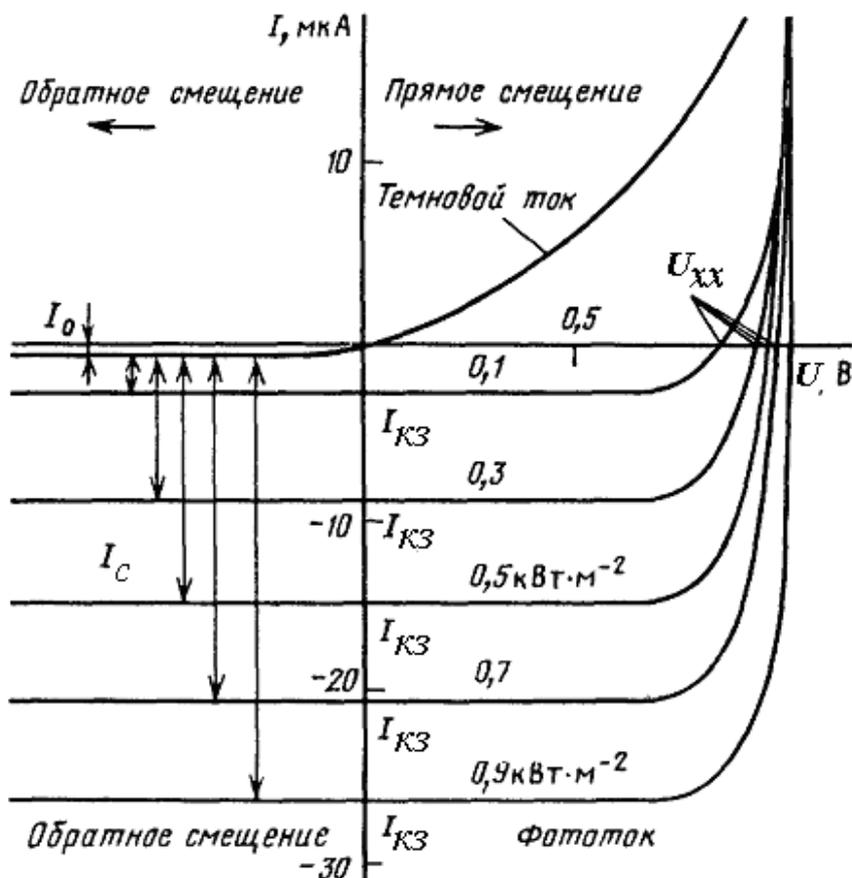


Рис. 6.4. Вольт-амперные характеристики  $p$ - $n$ -перехода при различных облученностях приемной поверхности:  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания

Из рис. 6.4 видно, что сила тока во внешней цепи  $I$  всегда определяется разностью:

$$I = I_T - I_C; \quad (6.4)$$

$$I = I_0 \exp[eU/(kT) - 1] - I_C.$$

Фототок определяется количеством фотонов, поглощенных вблизи области  $p$ - $n$ -перехода. Пусть  $G_0$  – плотность потока, приходящего к поверхности фотоэлемента излучения, тогда на глубине  $x$  поглощенная единицей площади энергия

$$G = G_0 - G_x = G_0\{1 - \exp[K(\nu)x]\}, \quad (6.5)$$

$$dG/dx = -K(\nu)G_x, \quad (6.6)$$

где  $K(\nu)$  – показатель ослабления (экстинкции) (рис. 6.2), сильно зависящий от частоты. Фотоны с энергиями, меньшими ширины запрещенной зоны, практически не поглощаются. Если частота падающего излучения превышает границу полосы поглощения материала, то на глубине  $1/K$  поглощается 63 % потока энергии, на глубине  $2/K$  – 86 %, на глубине  $3/K$  – 95 %. Для кремния глубина  $2/K$  равняется примерно 400 мкм. Это значение ограничивает минимальную толщину материала солнечного элемента.

### 6.3. Потребляемая солнечная энергия

Для генерации фототока в кремниевом солнечном элементе (Si–СЭ) наиболее существенно следующее.

1. Поглощение фотонов с энергией  $h\nu < E_g$ , недостаточной для генерации фототока (область *A* на рис. 6.5), приводит к нагреву материала.
2. При частотах излучения, превышающих границу полосы поглощения ( $h\nu > E_g$ ) избыток энергии фотонов ( $h\nu - E_g$ ) также расходуется на нагрев.
3. Существует оптимальная ширина запрещенной зоны, при которой поглощаемая СР максимально используется для генерации электроэнергии (рис. 6.6).

Спектральный состав и плотность потока СР у поверхности Земли меняются в зависимости от длины оптического пути световых лучей в атмосфере. Длина этого пути характеризуется величиной, называемой оптической атмосферной массой  $m$ , которая связана с углом  $\theta$  между направлением на Солнце и прямой, проходящей через зенит, зависимостью  $m = 1/\cos\theta$ . Если Солнце находится в зените, то  $m = 1$  (условие АМ1), при его удалении от зенита оптическая атмосферная масса возрастает. В Российской Федерации в начальных стандартных условиях принимается АМ1, АМ1,5 и АМ0 (спектр солнечного излучения за пределами атмосферы при нулевой атмосферной массе).

4. Только фотоны, энергия которых соответствует области *B* на рис. 6.5, участвуют в генерации фототока в СЭ. Доля энергии этих фотонов в полной энергии приходящего солнечного излучения  $[B/\{A+B+C\}]$ .

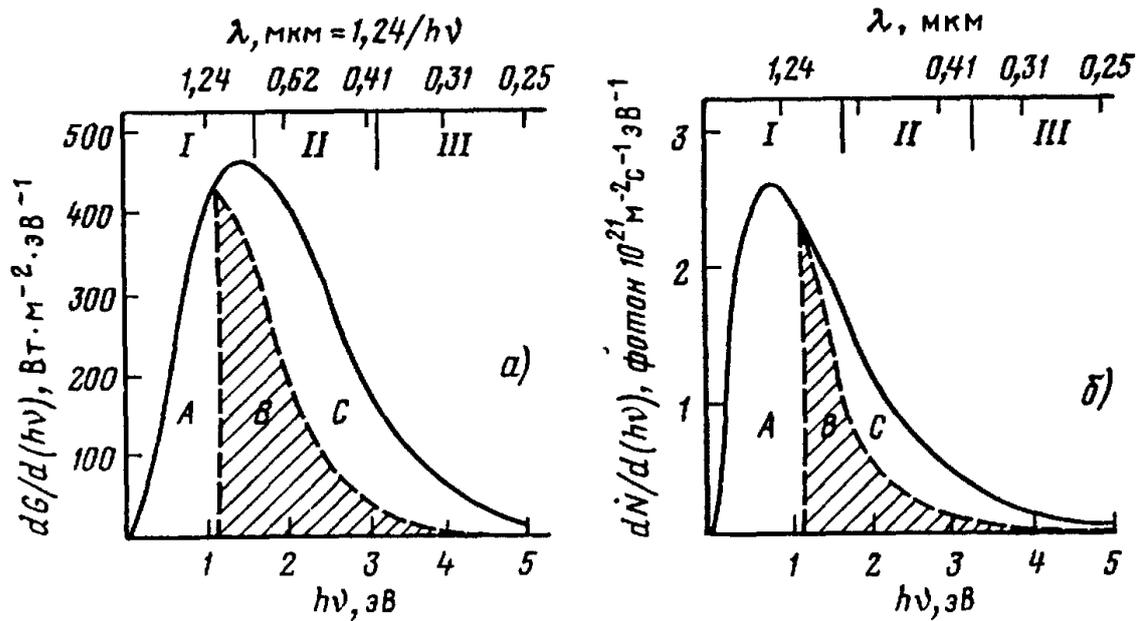


Рис. 6.5. Спектральное распределение солнечного излучения. Зависимость интенсивности от энергии фотонов (AM0) (а) и плотности потока фотонов от энергии фотонов (AM1) (б). Область А – энергия фотонов недостаточна для генерации фототока в кремниевом элементе; область В – энергия фотонов достаточна для генерации фототока, область С – неиспользуемый избыток энергии фотонов (I, II, III — то же, что и на рис. 6.2)

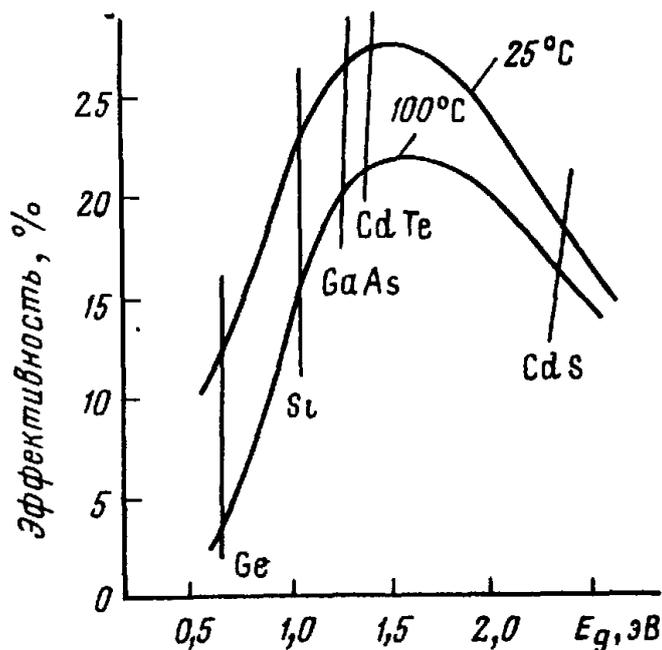


Рис. 6.6. Зависимость максимальной ожидаемой эффективности гомопереходных солнечных элементов от ширины запрещенной зоны. Видно, что при повышении температуры эффективность снижается. Отмечены значения ширины запрещенной зоны для основных материалов

#### 6.4. Фотоэлектрические свойства цепи и нагрузки

СЭ используется для получения электроэнергии. На эквивалентной диаграмме приведены основные макроскопические характеристики генератора (рис. 6.7).

Положительное направление тока  $I$  устройства в целом совпадает с положительным направлением тока в СЭ. При постоянном радиационном потоке асимметрия вольт-амперной характеристики (рис. 6.8) определяется наличием темнового тока  $I_T$ . Это относится к области диодной характеристики, где  $U$  – положительно, а  $I$  – отрицательно.

Максимум энергии достигается, если значения произведения  $U \cdot I$  совпадают с линией максимальной мощности (ЛММ) при изменении облученности и сопротивления нагрузки (рис. 6.8). Это соответствует почти постоянному напряжению в пределах 25 %  $U_{XX}$ . В отличие от чисто омической нагрузки, когда падение напряжения на нагрузке зависит от силы тока в цепи, в случае аккумуляторной батареи (АБ) при изменении силы тока разность потенциалов остается практически постоянной. Для АБ можно регулировать  $U$  и  $I$  так, чтобы находиться вблизи ЛММ на ВАХ. ЭДС батареи меняется в зависимости от заряда в диапазоне около 10 % максимума. При любой нагрузке лучшее сочетание параметров достигается при использовании устройств регулировки нагрузки по максимальной мощности (РПМ). РПМ – преобразователи постоянного тока. Использование их в цепи позволяет достигать полезного потребления в нагрузке 95 % максимальной выходной мощности при различных условиях освещения.

Из эквивалентной диаграммы (рис. 6.7) получаем:

$$I = I_c - I_T - \frac{U - IR_{\Pi}}{R_{\text{ш}}} \quad (6.7)$$

Выражение для темнового тока:

$$I_T = I_0 \{ \exp[e(U - IR_{\Pi}) / (AkT)] - 1 \}. \quad (6.8)$$

Для кремния  $I \sim 10^{-7} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Для более точного описания реальных характеристик здесь введен коэффициент идеальности  $A$ . Для всех фотоэлементов  $A > 1$ . Более высокие значения  $A$  приводят к появлению большей кривизны ВАХ и, следовательно, к снижению максимальной мощности. Этот эффект называется добавочным фактором. Он является следствием усиления рекомбинации электронов и дырок на дефектах кристалла.

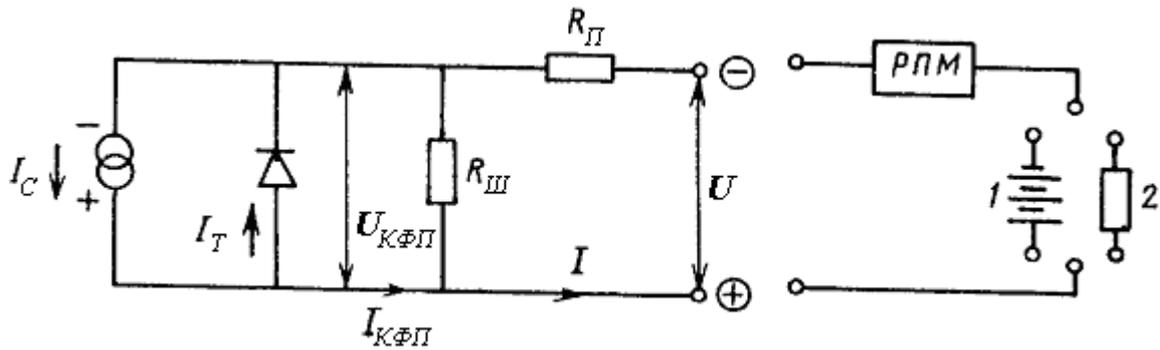


Рис. 6.7. Эквивалентная цепь СЭ. Показаны примеры нагрузок с устройством РПМ: 1 – АБ, 2 – омическая нагрузка

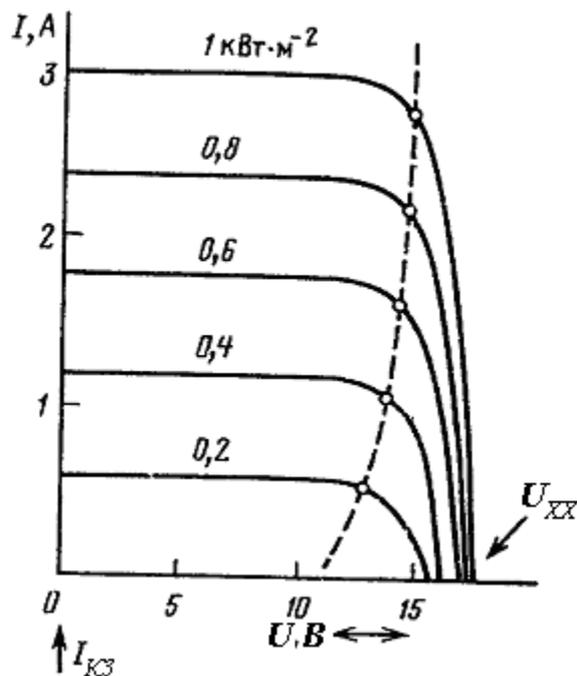


Рис. 6.8. ВАХ солнечной батареи из 33 Si-СЭ. Линия пиковой мощности (штриховая кривая) хорошо согласуется с областью напряжений, требуемых для зарядки АБ ( $\longleftrightarrow$ ), даже без использования устройства контроля нагрузки

Нагрев СЭ приводит к понижению  $U_{ХХ}$  и повышению  $I_{КЗ}$  с соответствующим изменением ВАХ.

Высокая эффективность получения энергии может быть обеспечена при выполнении следующих условий.

1. Ток  $I_C$  должен быть максимальным. Это может быть реализовано, если свести к минимуму потери фотонов при поглощении вблизи области потенциального барьера, снижении коэффициента отражения поверхности, уменьшении площади поверхности электрического контакта, повышении концентрации доноров и понижении концентрации центров рекомбинации.

2. Темновой ток  $I_T$  должен быть минимальным (например, вследствие высокой концентрации доноров).

3. Сопротивление  $R_{ш}$  должно быть как можно выше. Этого можно добиться путем тщательной обработки поверхностей фотоэлемента.

4. Сопротивление  $R_{п}$  должно быть малым. Это возможно при малых длинах пробега носителей к электрическим контактам и при использовании контактов и нагрузок с низким сопротивлением.

5. Для получения оптимальной мощности должно выполняться условие  $R_{вн} = U/I$ .

Батарея СЭ представляет собой комбинацию соединенных параллельно модулей. Каждый модуль в свою очередь является комбинацией последовательно соединенных СЭ. Каждый фотоэлемент состоит из параллельно соединенных СЭ (рис. 6.9). Максимальное падение напряжения на контактах открытой цепи модулей составляет примерно 15 В, максимальный ток через модуль – около 1,5 А. Для предотвращения лавинного пробоя параллельно каждой серии цепочек СЭ необходимо устанавливать шунтирующие диоды. При правильной эксплуатации безаварийная работа СЭ составляет 20 лет.

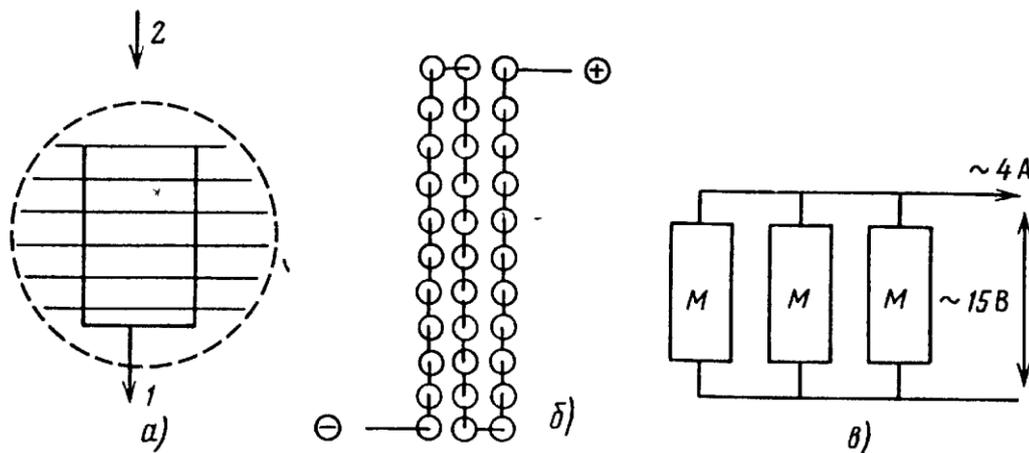


Рис. 6.9. Схемы устройств промышленных Si-СЭ: элемент (а), модуль из 33 элементов (б) и батарея (в): 1 – лицевой контакт, 2 – тыльный

При создании модулей происходят дополнительные по сравнению с ФП потери мощности: 1) схемные электрические потери, обусловленные наличием статистического разброса характеристик ФП; 2) коммутационные потери, связанные с процессами пайки или сварки ФП; 3) оптические потери, обусловленные необходимым использованием защитных и терморегулирующих покрытий, например стекла, и ламинирования модулей с использованием клеящих составов. Наличие потерь приводит к уменьшению КПД обычного

плоского фотоэлектрического модуля на несколько процентов по сравнению со средним КПД составляющих его СЭ.

Для фотоэлектрических модулей с концентраторами солнечного излучения появляются специфические оптические потери в системе концентрирования, приводящие к понятию оптического КПД концентратора.

Существуют также менее принципиальные для наземного использования модулей потери, связанные с неполным заполнением площади модуля ФП или концентраторами, вызванным или невозможностью их полной упаковки, например, при круглой форме ФП, или необходимостью места для расположения коммутационных шин и кабелей. Более того, иногда промежутки между ФП создаются специально для нанесения на них теплорегулирующих слоев.

Отечественная промышленность выпускает следующие типы модулей, батарей СЭ и СЭС:

1. ФСМ–30-12 мощностью 27–33 Вт и выходным напряжением постоянного тока  $U = 17,5–19,2$  В.
2. Солнечная батарея Солар 1-9 мощностью 1 Вт,  $U = 9$  В и КПД  $> 12\%$ .
3. Солнечная батарея БСП-10 мощностью 10 Вт, с  $U = 4,5–12,0$  В.
4. Фотоэлектрическая станция ФЭС–0,5/24–220 мощностью 500 Вт с  $U = 24$  В и  $U_{\sim} = 220$  В  $\pm 10\%$ .
5. Автономные источники питания АИП–750 с номинальной мощностью 750 Вт и максимальной 900 Вт, номинальным  $U = 27,5 \pm 0,5$  В и др.

### Контрольные вопросы

1. Понятие солнечного элемента с гетеропереходом.
2. Сформулируйте принцип действия солнечных элементов с  $p-n$ -переходом.
3. Какую основную функцию выполняет потенциальный барьер в солнечном элементе?
4. Разъясните различие гетеропереходов в приборах с резким  $p-n$ -переходом, резким  $p-i$ -переходом в  $p-i-n$ -структуре и варизонным  $p-n$ -переходом.
5. Какие факторы обуславливают потери энергетического выхода солнечных элементов?
6. Проведите анализ эквивалентной цепи солнечного элемента.
7. Изобразите графически вольт-амперную характеристику (ВАХ) типичной солнечной батареи из тридцати трех кремниевых элементов для зна-

чения плотности солнечной радиации 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 кВт/м<sup>2</sup>. Дайте определение линии максимальной мощности.

8. Какие материалы используются в солнечных элементах? Зависимость КПД солнечного элемента от его температуры.

9. Укажите факторы, обеспечивающие высокую плотность тока короткого замыкания ( $\approx 400 \text{ А/м}^2$ ) при относительно малых величинах напряжения холостого хода ( $\approx 0,4 \text{ В}$ ) и коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики ( $\approx 0,65$ ) для солнечного элемента с *p-i-n*-на основе (CdZn)S-CuInSe<sub>2</sub>.

10. Каковы условия обеспечения высокой эффективности получения электрической энергии солнечным элементом?

11. Каковы причины, обуславливающие преимущества структур с гетеропереходом и экономическую эффективность производства тонкопленочных солнечных элементов?

12. Каковы конструктивные особенности модуля и батареи солнечных элементов?

13. Разъясните высокий теоретический и практический КПД многоступенчатых каскадных элементов.

14. Сформулируйте перспективы использования на практике батарей из аморфных водородированных кремниевых элементов  $\alpha\text{Si:H}$ .

15. Что такое концентратор солнечного излучения?

16. Какие солнечные элементы экономически эффективно использовать в энергетических системах с концентраторами солнечного излучения?

17. Составными частями солнечных батарей второго поколения являются линзы, монокристаллические кремниевые элементы, теплообменники, межэлементные соединения, устройство слежения за Солнцем и опорная несущая конструкция. Какие компоненты конструкции в основном обеспечивают высокую экономическую и энергетическую эффективность солнечной электрической станции?

18. В каких регионах России целесообразно применять полупроводниковую фотоэнергетику?

## **Глава 7. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ. ЭНЕРГИЯ ОКЕАНА, ПРИЛИВОВ И ВОЛН**

### **7.1. Введение**

Геотермальную энергию получают от источников тепла с высокими температурами. Сведения о геотермальных структурах получают при геологической съемке, проходке шахт, нефтяных скважин. Наиболее важным параметром является температурный градиент. При глубоком бурении скважины обычно достигают отметки 6 км и более. Технология обустройства таких скважин и строительства ГеоТЭС может считаться решенной.

В ядре нашей планеты максимальная температура достигает 4000 °С. 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 Вт/м<sup>2</sup> при температурном градиенте менее 30 °С/км. Имеются районы с повышенными градиентами температуры, где потоки составляют примерно 10–20 Вт/м<sup>2</sup>. Это позволяет реализовать геотермальные станции (ГеоТЭС) тепловой мощностью 100 МВт/км<sup>2</sup> и продолжительностью срока эксплуатации не менее 20 лет.

Качество геотермальной энергии обычно невысокое, и лучше его использовать непосредственно для отопления зданий или для предварительного подогрева рабочих тел обычных высокотемпературных установок. Подобные отопительные системы эксплуатируются во многих частях света. Если тепло из недр получают при температуре около 150 °С, то возможно преобразование его в электроэнергию.

### **7.2. Внутреннее строение Земли. Три класса геотермальных районов**

Внутренняя структура планеты показана на рис. 7.1. Теплопередача от полужидкой мантии поддерживает температурную разность между внутренней и внешней поверхностями сравнительно тонкой коры около 1000 °С при среднем градиенте температур около 30 °С/км. Твердые породы коры имеют среднюю плотность 2700 кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость 1000 Дж/(кг·К) и теплопроводность 2 Вт/(м·К). Средний геотермальный поток составляет примерно 0,06 Вт/м<sup>2</sup>, а примерно 10<sup>20</sup> Дж/км<sup>2</sup> в виде тепла аккумулировано в коре.

Если за 30 лет преобразовать только 0,1 % этого тепла, то тепловая мощность составит  $100 \text{ МВт/км}^2$ . Следовательно, геотермальные ресурсы занимают одно из первых мест по своему суммарному теплоэнергетическому потенциалу и концентрации в пределах перспективных районов.

Земная кора получает тепло в результате естественного охлаждения и трения ядра; радиоактивного распада элементов, подобно торию и урану; химических реакций. Особенно много радиоактивных элементов в граните. В течение многих миллионов лет радиационный распад и химические реакции являются единственным существенным источником тепла.

При распространении тепла через однородные материалы от мантии к поверхности Земли градиент температуры будет постоянным. Он повышается в зонах с плохо проводящими тепло твердыми включениями и снижается в зонах повышенного теплообмена, например в насыщенных водой породах, где происходит конвективный перенос тепла. Аномально высокие температурные градиенты часто наблюдаются в местах расположения радиоактивных или экзотермических химических источников.

Выделяют три класса геотермальных районов.

**Гипертермальный.** Температурный градиент – более  $80 \text{ }^\circ\text{C/км}$ . Эти районы расположены в тектонической зоне вблизи границ континентальных плит.

**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.

**Нормальный.** Температурный градиент – менее  $40 \text{ }^\circ\text{C/км}$ . Такие районы наиболее распространены, именно здесь тепловые потоки в среднем составляют примерно  $0,06 \text{ Вт/м}^2$ . Маловероятно, чтобы в таких районах даже в ближайшем будущем стало экономически выгодно извлекать тепло из недр.

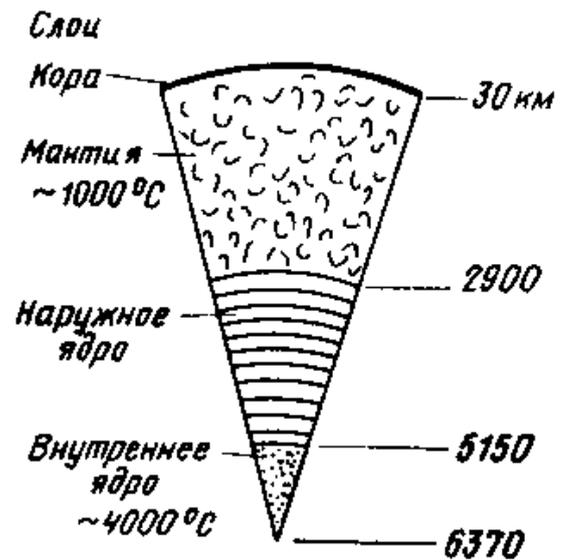


Рис. 7.1. Внутреннее строение Земли. Кора имеет существенные вариации по составу и толщине

### 7.3. Виды ресурсов и запасов геотермальной энергии

Отметим два основных класса геотермальной энергии.

**Гидрогеотермальные ресурсы** – часть ресурсов геотермальной энергии, которая заключена в естественных коллекторах. Они представлены природными теплоносителями: подземными водами, паром или пароводяными смесями.

**Петрогеотермальные ресурсы** – часть тепловой энергии, которая связана непосредственно со скелетом водовмещающих пород и с непроницаемыми горными породами. На природные теплоносители – термальные воды – приходится > 1 % и около 99 % на петрогеотермальные ресурсы. Практическое использование петрогеотермальных ресурсов сопряжено с необходимостью решения комплекса научно-технических проблем.

На практике ГеоТЭС в гипертермальных районах работают на естественной гидротермальной циркуляции; в полутермальных районах используется как естественная гидротермальная циркуляция, так и искусственный перегрев за счет извлечения тепла из сухих горных пород. Нормальные же районы обладают слишком малыми температурными градиентами, чтобы представлять коммерческий интерес.

На рис. 7.2 дана классификация Богуславского ресурсов и запасов геотермальной энергии.



Рис. 7.2. Классификация ресурсов и запасов геотермальной энергии

Прогнозные ресурсы гидротермальной энергии – это максимальное количество природного теплоносителя и тепловой энергии. Они могут быть получены в течение расчетного срока из системы условных водозаборов, размещенных равномерно по оцениваемой площади.

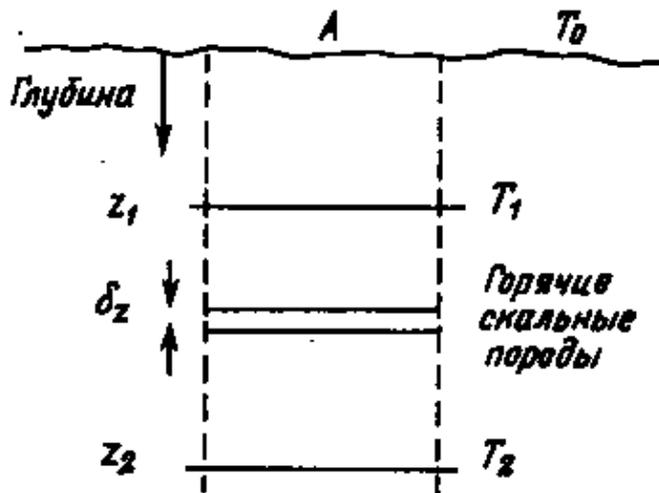
Эксплуатационные запасы гидротермальной энергии – часть прогнозных ресурсов. Они могут быть получены из оцениваемого водоносного горизонта водозаборными сооружениями при заданном режиме их эксплуатации и соответствующем качестве теплоносителя (температура, химический и газовый состав). Качество теплоносителя должно удовлетворять требованиям его целевого использования в течение всего расчетного срока эксплуатации.

#### 7.4. Анализ свойств сухих горных пород

**Сухие скальные породы.** Предположим, что определенная масса сухого скального материала расположена в толще коры сравнительно недалеко от поверхности (рис. 7.3). Скальные породы имеют плотность  $\rho_r$ , удельную теплоемкость  $c_r$ , площадь поперечного сечения рассматриваемого массива  $A$ . Для однородного материала в отсутствии конвекции с глубиной температура будет увеличиваться линейно. Если  $z$  растет по направлению от поверхности Земли (где  $z = 0$ ), то

$$T = T_0 + (dT/dz)z = T_0 + Gz. \quad (7.1)$$

Рис. 7.3. Структура системы из сухих горных пород (для расчета запаса тепла). Плотность  $\rho_r$ , удельная теплоемкость  $c$ , температурный градиент  $dT/dz = G$ ;  $A$  – площадь;  $T_0$  – поверхностная температура;  $T_1$  – минимальная полезная температура;  $T_2$  – температура на максимальной глубине



Положим, что минимально допустимая температура  $T_1$  соответствует глубине  $z_1$ , таким образом:

$$T_1 = T_0 + Gz_1; \quad z_1 = (T_1 - T_0)/G. \quad (7.2)$$

Полезное теплосодержание  $\delta E$  в элементе толщиной  $\delta z$  на глубине  $z$  при температуре  $T > T_1$  равно

$$\delta E = (\rho_r A \delta z) c_r (T - T_1) = (\rho_r A \delta z) c_r G (z - z_1). \quad (7.3)$$

Полное полезное теплосодержание скального грунта до глубины оказывается равным:

$$E = \int_{z=z_1}^{z_2} \rho_r A c_r G (z - z_1) dz = \rho_r A c_r G (z^2 / 2 - z z_1) \Big|_{z_1}^{z_2} = \rho_r A c_r G (z - z_1)^2 / 2. \quad (7.4)$$

Пусть средняя допустимая температура, превышающая  $T_1$ , равна  $\theta$ :

$$\theta = (T_2 - T_1) / 2 = G(z_2 - z_1) / 2. \quad (7.5)$$

В этом случае  $E_0 = C_r \theta$ , где  $C_r$  – теплоемкость горных пород, залегающих в слое между  $z_1$  и  $z_2$ :

$$C_r = \rho_r A c_r (z_2 - z_1). \quad (7.6)$$

Согласно (7.4)

$$E_0 = \rho_r A c_r G (z_2 - z_1)^2 / 2. \quad (7.7)$$

Допустим, что тепло извлекается из пород равномерно, пропорционально температуре, превышающей  $T_1$ , с помощью потока воды, имеющего объемный расход  $\dot{V}$ , плотность  $\rho_w$ , удельную теплоемкость  $c_w$ . В этом случае вода нагревается до температуры  $\theta$ . Таким образом,

$$\rho_w c_w \theta \dot{V} = -C_r (d\theta/dt), \quad (7.8)$$

$$d\theta/\theta = -[(\dot{V} \rho_w c_w)/C_r] dt = dt / \tau \quad (7.9)$$

и

$$\theta = \theta_0 e^{-t/\tau}. \quad (7.10)$$

Полезное теплосодержание  $E = C_r \theta$ , тогда

$$E = E_0 e^{-t/\tau}, \quad (7.11)$$

$$dE/dt = -(E_0/\tau) e^{-t/\tau}, \quad (7.12)$$

где постоянная времени  $\tau$  равна

$$\tau = C_r / (\dot{V} \rho_w c_w) = \rho_r A c_r (z_2 - z_1) / (\dot{V} \rho_w c_w). \quad (1.13)$$

## 7.5. Использование геотермальных ресурсов

Геотермальную энергию получают от источника тепла с высокими температурами. Она обладает следующими особенностями: 1) температура теплоносителя существенно ниже температуры при сжигании топлива; 2) суммарные запасы геотермальной энергии велики, ее термодинамическое качество низкое.

### 7.5.1. Сочетание возможностей и потребностей

Наилучший способ утилизации геотермальной энергии – использование комбинированного режима (выработка электроэнергии и обогрева). Электроэнергия может быть подана в энергосистему и через нее передана потребителям наряду с электроэнергией, вырабатываемой другими источниками. Однако потребность в тепле при температуре до 100 °С обычно выше, чем в электроэнергии. Выработка электроэнергии будет представлять интерес, если теплоноситель имеет температуру более 300 °С, и не будет, если последняя ниже 150 °С.

Тепло сложно передавать на расстоянии 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 1 км<sup>2</sup> (более 100 усадеб на 1 км<sup>2</sup>). Таким образом, тепловая станция мощностью 100 МВт может обслуживать жилой район площадью примерно 20×20 км при расходе тепла около 2 кВт на усадьбу. Подобная геотермальная система давно используется в Исландии. Другие крупные потребители тепла – теплицы (до 60 МВт/км<sup>2</sup> в одной установке), фермы для разведения рыб, установки для сушки пищевых продуктов и для реализации других технологий.

Основным фактором стоимости оказываются капитальные затраты на сооружение скважин, стоимость которых экспоненциально увеличивается с ростом их глубины. В большинстве случаев ограничиваются оптимальной глубиной скважины ~ 5 км. Масштаб энергетических установок обычно выбирают > 100 МВт (электрических или тепловых – для высоких температур, только тепловых – для низких температур).

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 (содержать до 25 кг/м<sup>3</sup> солей).

### 7.5.2. Техника извлечения тепла

Наиболее успешно реализованные проекты имеют скважины, пробуренные непосредственно в естественные подземные коллекторы геотермальных районов (рис. 7.4). Этот метод используется в Гейзерах (Калифорния) и в Уайракее (Новая Зеландия), где в скважинах существует значительное давление и можно обойтись без насосных систем.

Последние разработки направлены на извлечение тепла из сухих горных пород, так как они могут обеспечить относительно большую производительность.

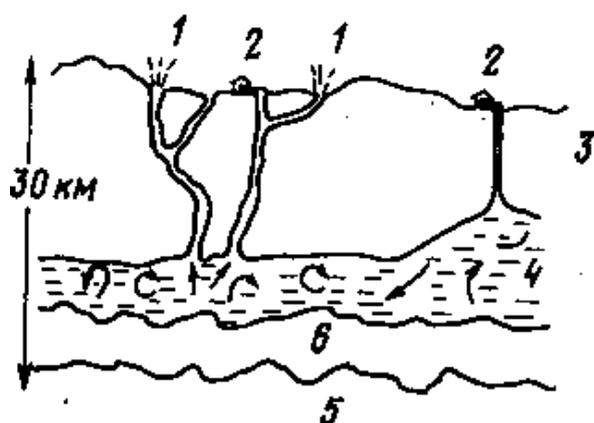


Рис. 7.4. Схема размещения гидро-термальных станций в гипертермальном районе (геотермальное поле Гейзеры, Калифорния):

1 – естественный гейзер; 2 – энергетическая станция; 3 – глубокая скважина (5 км); 4 – пароводяной источник ( $\sim 280^\circ\text{C}$ ); 5 – мантия; 6 – горячие скальные породы

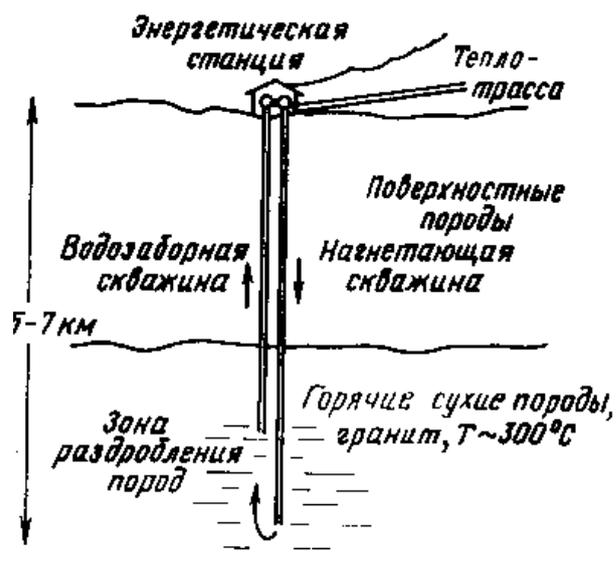


Рис. 7.5. Схема извлечения тепла из сухих горных пород

Разработаны методы дробления скал гидроразрывом с помощью холодной воды, нагнетаемой под давлением в скважину (рис. 7.5). После предварительного дробления пород вода нагнетается через питающую скважину. Фильтруется через скальные породы на глубине около 5 км при температуре  $250^\circ\text{C}$ . Теплая вода возвращается на поверхность через приемную скважину. Две такие скважины могут обеспечить энергией установку мощностью порядка гигаватта.

### 7.5.3. Системы генерации электроэнергии

Выбор теплообменников и турбин для обычных геотермальных источников – комплексная задача, требующего специального опыта. Несколько вариантов возможных схем ГеоТЭС приведено на рис. 7.6.

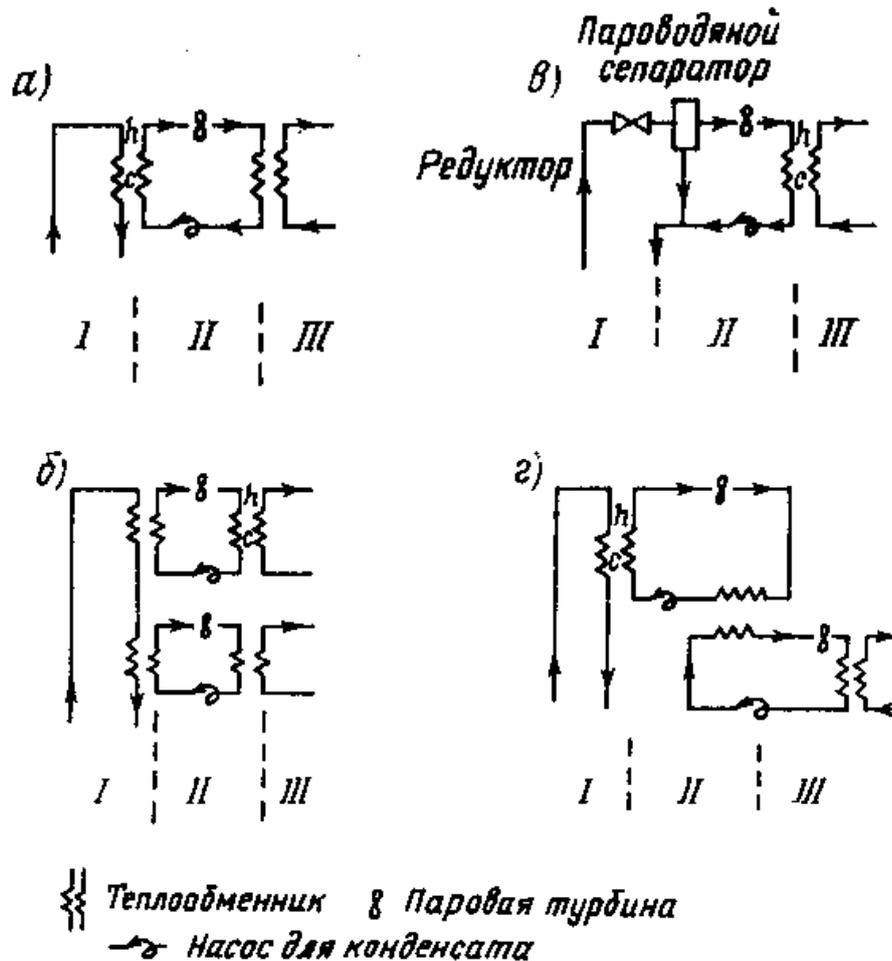


Рис. 7.6. Примеры организации цикла для производства электроэнергии. Цикл с одним рабочим телом, например с водой или фреоном (а); цикл с двумя рабочими телами – водой и фреоном (б); прямой паровой цикл (в) и двухконтурный цикл (г); I – геотермальный источник; II – турбинный цикл; III – охлаждающая вода

Если для получения электроэнергии используются источники с низкой температурой, то для приведения в действие турбин приходится вместо воды применять другие рабочие жидкости (например, фреон, толуол). Новые виды техники нуждаются в повышении эффективности. Особые трудности могут возникнуть с теплообменниками из-за высокой концентрации в воде из скважин различных химических веществ.

## 7.6. Преобразование тепловой энергии океана

Мировой океан – крупнейший естественный коллектор солнечного излучения. В нем между теплыми поглощающими солнечное излучение поверхностными водами и более холодными придонными достигается разность температур в 20 °С. Этот запас тепловой энергии может быть преобразован в другие виды.

## 7.7. Энергия приливов

Во время приливов и отливов в океанах перемещение водных масс образует приливные течения, скорость которых в прибрежных проливах и между островами может достигать ~ 5 м/с. Энергия приливных течений может быть преобразована подобно энергии ветра. Мощность, снимаемая с 1 м<sup>2</sup> площади поперечного сечения приливного потока при максимальной скорости  $U_0$ , равна примерно  $\bar{q} \approx 0,1\rho \cdot U_0^3$ . Для  $U_0 = 3$  м/с величина  $\bar{q} \approx 14$  кВт/м<sup>2</sup>.

## 7.8. Энергия волн

Огромные количества энергии можно получить от морских волн. Мощность, переносимая волнами на глубокой воде, пропорциональна квадрату их амплитуд и периоду. Поэтому практически важными представляются длиннопериодные ( $T \sim 10$  с) волны большой амплитуды ( $a \sim 2$  м), позволяющие снимать с единицы длины гребня в среднем от 50 до 70 кВт/м. Возможность преобразования энергии волн в электрическую доказана уже давно. Существует множество технических решений, позволяющих реализовать эту возможность. Современная тенденция разработки таких устройств ориентирована на единичные модули мощностью 1 МВт, размерами порядка 50 м вдоль фронта волны.

## Контрольные вопросы

1. Что такое геотермальное тепло?
2. Какое количество тепловой энергии аккумулировано в земной коре?
3. Объясните внутреннюю структуру планеты.
4. В каких районах могут быть реализованы геотермальные станции тепловой мощностью 100 мВт/км<sup>2</sup> и с продолжительностью эксплуатации  $\geq 20$  лет?
5. В результате каких факторов земная кора получает тепло?

6. Предположим, что теплопроводность – единственный механизм теплопередачи. При переходе тепла от мантии к поверхности Земли градиент температуры каких материалов будет повышаться, снижаться и оставаться постоянным?

7. Какие сведения о геотермальных структурах получают при геологической съемке, проходке шахт и нефтяных скважин?

8. Чему равны температурные градиенты гипертермального, полутермального и нормального районов и на каких участках территории они расположены?

9. Разъясните возможность получения тепловой энергии в трех классах геотермальных районов за счет естественной гидротермальной циркуляции, искусственного подогрева и охлаждения сухих скальных пород.

10. Что такое геотермальные ресурсы?

11. Что такое петрогеотермальные ресурсы?

12. Объясните классификацию ресурсов и запасов геотермальной энергии.

13. Изобразите графически структуру системы из сухих горных пород для расчета запаса тепловой энергии.

14. С помощью каких выражений и данных можно оценить полное полезное теплосодержание скального грунта до максимальной глубины и теплоемкость горных пород  $C_r$  в слое между  $z_1$  и  $z_2$ ?

15. По какой формуле можно оценить постоянную времени извлечения тепла  $\tau$  из сухой скальной породы при использовании в качестве теплоносителя воды? Используйте следующие обозначения:  $C_r$  – теплоемкость горных пород,  $\dot{V}$  – объемный расход потока воды с плотностью  $\rho_w$  и удельной теплоемкостью  $C_w$ .

16. На основании формулы для полного полезного теплосодержания в сухой горной породе  $E = E_0 e^{-t/\tau}$  получите выражение для скорости извлечения тепла  $dE/dt$ .

17. Изобразите графически профиль горячего водоносного слоя для расчета запаса тепла. Используйте следующие обозначения:  $A$  – площадь поперечного сечения рассматриваемого массива,  $z$  – направление изменения глубины,  $T_0$  – поверхностная температура,  $T_1$  – минимальная полезная температура,  $T_2$  – температура скальной породы на глубине  $z_2$  (над водоносным слоем) и всей массы жидкости,  $p'$  – часть пласта, занятая заполненными водой порами,  $h$  – толщина водоносного слоя, которая значительно меньше глубины его залегания ( $h \ll z_2$ ).

18. По каким выражениям для горячего водоносного слоя можно оценить начальную температуру, теплоемкость, теплосодержание и скорость извлечения тепловой энергии?
19. Каковы факторы, определяющие масштабы использования геотермальной энергии?
20. Разъясните схему извлечения тепла из сухих горных пород.
21. Назовите варианты возможных схем ГеоТЭС.
22. Определите мощность, переносимую морскими волнами на глубокой воде. Какова энергетическая эффективность длинопериодных ( $T \sim 10$  с) волн большой амплитуды ( $a \sim 2$  м)?
23. Какие факторы сдерживают развитие волновой энергетики?
24. Сформулируйте преимущества волновой энергии и основные представления, необходимые для уяснения работы волновых энергетических устройств.
25. Какие типы устройств для преобразования энергии волн используются на практике?
26. Основные периоды приливных колебаний уровня в океанах. Что такое высота и ход приливов?
27. Какие трудности возникают при преобразовании приливной энергии?
28. Назовите перспективные районы строительства приливных электростанций.
29. Каковы способы преобразования тепловой энергии океана?

## Глава 8. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

### 1. Ветроэнергетика

**Задача 1.** Доля преобразуемой ВЭУ энергии ветра равна коэффициенту мощности  $C_N = 4a(1-a)^2$ . Продифференцировав это выражение по  $a$ , покажем, что максимальное значение  $C_N^{\max} = 16/27$  в рамках линейной модели достигается при  $a = 1/3$ .

**Решение.**

$$\frac{dC_N}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0,$$

$$3a^2 - 4a + 1 = 0.$$

Корни квадратного уравнения равны

$$a_{1,2} = \frac{4 \pm \sqrt{16 - 4 \cdot 3}}{2 \cdot 3} = \frac{4 \pm 2}{6},$$

$$a_1 = 1/3, \quad a_2 = 1.$$

В рамках линейной модели  $0 < a < 1/2$ . Поэтому  $a = 1/3$ ,  $C_N^{\max} = 16/27 = 0,59$ .

**Задача 2.** ВЭУ при любой скорости ветра поддерживает постоянным коэффициентом быстроходности  $Z = 8$ . При какой скорости ветра скорость концов лопастей ветроколеса достигает скорости звука?

**Решение.**

$$V_R = Z \cdot V_0. \text{ Если } V_R = 330 \text{ м/с, то } V_0 = \frac{330 \text{ м/с}}{8} = 41 \text{ м/с.}$$

**Задача 3.** ВЭУ имеет ветроколесо с  $D = 100$  м, вращающееся с постоянной угловой скоростью. При какой угловой скорости вращения скорость концов лопастей достигнет скорости звука?

**Решение.**

$$\omega = V_R/R = (330/50) \text{ с}^{-1} = 6,6 \text{ рад}^{-1}, \quad f = \omega/2\pi = 1,1 \text{ Гц.}$$

### 2. Гидроэнергетика

**Задача 1.** Определить диаметр колеса активной гидротурбины с одним соплом ( $n = 1$ ) мощностью 160 кВт при значениях рабочего напора  $H_a$ , равных 81 и 5 м, и соответствующие им оптимальные условия скорости, при ко-

торых достигаются максимальные значения КПД. Принимают  $\eta = 0,9$ ;  $r/R = 1/12$ , плотность воды  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

**Решение.**

Находим значение коэффициента быстроходности  $L$ :

$$L = \frac{1}{0,68} \cdot \frac{r}{R} \sqrt{n \cdot \eta} = \frac{1}{0,68} \cdot \frac{1}{12} \sqrt{1 \cdot 0,9} = 0,116.$$

Определяем величину скорости набегающего потока для  $H_a = 81 \text{ м}$ :

$$U_{j1} = \sqrt{2g81} = 40 \text{ м/с}.$$

Соответствующая угловая скорость  $\omega$  для  $H_a = 81 \text{ м}$  равна:

$$\omega_1 = \frac{\frac{1}{L \cdot \rho^2} (g \cdot H_{a1})^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{N}} = \frac{0,116 \cdot 1000^2 (10 \cdot 81)^{\frac{5}{4}}}{(160 \cdot 10^3)^{\frac{1}{2}}} = 39,6 \text{ рад/с}.$$

Тогда

$$R_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{j1}}{\omega_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{40}{39,6} = 0,5 \text{ м},$$

$$D_1 = 2R_1 = 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ м}.$$

Точно так же для  $H_a = 5 \text{ м}$  находим

$$\omega_2 = \omega_1 (5/81)^{5/4} = 1,1 \text{ рад/с};$$

$$U_{j2} = 10 \text{ м/с}; R_2 = 4,5 \text{ м}.$$

Сравнивая эти результаты, видим, что при одинаковой мощности турбины, работающие при малом напоре, вращаются медленнее. Они имеют большие габариты, следовательно, и стоят дороже. Поэтому на практике активные турбины используют при небольших расходах и высоких напорах воды.

### 3. Гелиоэнергетика

**Задача 1.** Тепловой баланс открытой черной емкости. Рассмотрим прямоугольную черную резиновую емкость, размеры которой  $1 \times 1 \times 0,1 \text{ м}$ , толщина стенок  $5 \text{ мм}$ , помещенную на тонкую не проводящую тепло горизонтальную решетку (подставку) достаточно высоко над землей. Емкость содержит  $100 \text{ л}$  воды. Поток солнечного излучения, падающего на поверхность емкости,  $G = 750 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Температура окружающего воздуха  $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , скорость ветра  $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Определите сопротивление емкости тепловым потерям,

оцените максимальную среднюю температуру воды и время, за которое вода может быть нагрета до такой температуры.

**Решение.**

Слой резины является приемной площадкой системы. В равновесии, когда вода уже нагрета, максимальная температура воды равна температуре слоя резины. Так как теплоемкость тонкого слоя резины много меньше теплоемкости воды и термическое сопротивление слоя пренебрежимо мало, рассмотрим черный резервуар и его содержимое как один сложный объект, имеющий температуру  $T_{\text{пр}} = T_{\text{ж}}$ ; коэффициент поглощения  $\alpha = 0,9$ ; теплоемкость  $C_f = mc$ . В таком приближении сопротивление  $R_{\text{пр.тепл}} = 0$  и  $\eta_{\text{пр.тепл}} = 1$ .

С учетом  $\tau_{\text{покр}} = 1$ , что соответствует отсутствию покрытия, уравнение теплового баланса открытого черного приемника имеет вид

$$mc \frac{dT_{\text{ж}}}{dt} = \alpha AG - (T_{\text{пр}} - T_a) / R_T. \quad (8.1)$$

Во многих случаях потери тепла вследствие излучения и конвекции не равны. Конвективный перенос тепла происходит от емкости к окружающей среде с температурой  $T_a$ , а радиационный – к верхним слоям атмосферы с температурой  $T_s$  и/или к окружающей среде. В данном примере  $T_s$  и  $T_a$  считают постоянными.

Сопротивление конвективным тепловым потерям

$$R_{v,pa} = 1/h_v A, \quad (8.2)$$

где в соответствии со справочными материалами

$$h_v = 24,7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (8.3)$$

Радиационный поток тепла к верхним слоям атмосферы определяется уравнением

$$P_{r,ps} = \varepsilon_p \sigma A (T_{\text{пр}}^4 - T_s^4), \quad (8.4)$$

где эффективная температура неба  $T_s = T_a - 6 \text{ К}$ .

Выражение (8.4) для потока тепла также можно записать

$$P_{r,ps} = h_{r,pa} A (T_{\text{пр}} - T_a). \quad (8.5)$$

Тождественное равенство (8.4) выполняется, если положить

$$\frac{1}{AR_{r,pa}} = h_{r,pa} = \frac{\varepsilon_p \sigma (T_{\text{пр}}^2 + T_s^2)(T_{\text{пр}} + T_s)(T_{\text{пр}} - T_s)}{T_{\text{пр}} - T_a}. \quad (8.6)$$

Параметр  $h_{r,pa}$  слабо зависит от  $T_{пр}$ . Полагая  $T_{пр} = 40\text{ }^\circ\text{C}$ , находим  $h_{r,pa} = 7,2\text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $r_{pa} = 0,031\text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и  $R_T = 0,015\text{ К} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

Максимально возможная температура достигается, когда имеет место баланс подводимого тепла и потерь, и выражение (8.1) преобразуется в формулу вида

$$(T_{пр} - T_a)/R_T = \alpha A_{пр} G.$$

Итак, для рассматриваемого резервуара  $T_{ж} = 31\text{ }^\circ\text{C}$ .

Оценим время, необходимое для достижения этой температуры. Скорость, с которой поднимается  $T_{ж}$  при средней температуре  $T_{ж} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , определим согласно (8.1). Используя рассчитанную величину  $R_T$ , находим  $(dT_{ж}/dt)_{25\text{ }^\circ\text{C}} = 8,1 \cdot 10^{-4}\text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$ . Время, необходимое для повышения температуры на  $\Delta T = T_{пр} - T_a = 31 - 20 = 11\text{ }^\circ\text{C}$ , составляет примерно

$$t = \Delta T / (dT_{ж} / dt) = 1,3 \cdot 10^4\text{ с} = 3,7\text{ ч.}$$

На практике плотность солнечного излучения  $G$  меняется в течение дня, так что расчеты дают только порядок величин  $\Delta T$  и  $t$ . Для получения более точных результатов необходимо решать уравнение (8.1) с учетом данных на каждый час по облученности поверхности приемника, а также расслоения воды по температуре.

#### 4. Полупроводниковая фотоэнергетика

**Задача 1.** Оцените границу полосы поглощения солнечного излучения для кремниевого СЭ.

**Решение.**

Для кремния граница полосы поглощения соответствует

$$\nu > E_g / h \approx \frac{(1,1\text{ эВ}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж} \cdot \text{эВ}^{-1})}{6,63 \cdot 10^{-34}\text{ Дж} \cdot \text{с}} = 0,27 \cdot 10^{15}\text{ Гц},$$

$$\lambda \approx \frac{3,0 \cdot 10^8\text{ м} \cdot \text{с}^{-1}}{0,27 \cdot 10^{15}\text{ с}^{-1}} = 1,1\text{ мкм.}$$

**Задача 2.** Небольшая домашняя осветительная система питается от аккумуляторной батареи (АБ) напряжением 8 В. ЭДС отдельного кремниевого солнечного элемента (Si-СЭ)  $E_{Si} = 0,5\text{ В}$ , коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую равен 0,8. Какой должна быть фотоэлектрическая энергетическая система, содержащая Si-СЭ, чтобы заряжать АБ? Как

будут расположены СЭ? Как будет собрана электрическая цепь? Как вы будете проверять цепь и определять КПД?

**Решение.**

$$\text{Количество СЭ} = \frac{8 \text{ В}}{0,8 \cdot 0,5 \text{ В}} = 20 \text{ элементов.}$$

Следовательно, требуется последовательное соединение 20 элементов.

Для определения КПД солнечной электрической станции (СЭС) проверяются ток короткого замыкания  $I_{\text{КЗ}}$  и напряжение холостого хода  $U_{\text{ХХ}}$  при условии нормального падения направленной солнечной радиации на приемную поверхность Si–СЭ.

**Задача 3.** (В рассматриваемой задаче используют данные задачи 2.) Освещение включается каждый вечер на 4 ч, потребляемый ток – 3 А. Для зарядки АБ используется СЭС каждый день с 9 до 12 ч. Для Si–СЭ плотность тока  $J = 200 \text{ А/м}^2$ . Определите радиус отдельного Si–СЭ.

**Решение.**

Каждый вечер расходуется 12 А·ч, поэтому от СЭ требуется ежедневно 12 А·ч/0,8 = 15 А·ч. СЭ освещены Солнцем каждый день в течение 3 ч. Тогда требуемый ток заряда АБ составляет

$$\frac{15 \text{ А} \cdot \text{ч}}{3 \text{ ч}} = 5 \text{ А.}$$

При последовательном соединении  $I = 5 \text{ А}$  может быть получен с площади

$$S = \frac{5 \text{ А}}{2 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}} = 250 \text{ см}^2.$$

Тогда площадь отдельного СЭ

$$\frac{250 \text{ см}^2}{20} = 12,5 \text{ см}^2,$$

$$\pi \cdot R^2 = 12,5 \text{ см}^2,$$

$$R = \sqrt{\frac{12,5 \text{ см}^2}{\pi}} \cdot \frac{1}{0,8} = 2,5 \text{ см.}$$

Таким образом, последовательно соединенных 20 элементов радиусом 2,5 см каждый достаточно для зарядки АБ в условиях предполагаемого радиационного потока.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

(используемая и рекомендуемая литература)

1. Абдрахманов Р.С. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Программа, методические указания и контрольные задания. Для студентов заочной формы обучения. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2002. – 48 с.
2. Абдрахманов Р.С. Ожидаемые эксплуатационные показатели ветро-электрических станций в условиях Архангельской и Тюменской областей. Современные глобальные и региональные изменения геосистем. Материалы Всерос. науч. конф., посвященной 200-летию Казанского университета. – Казань: Изд-во КГУ, 2004. – С. 250–252.
3. Абдрахманов Р.С. Перспективы вклада малых ТЭС на древесном топливе в энергетику районов Татарстана. Инновационное образование: проблемы, поиски, решения. Материалы IV междунар. науч.-метод. конф. / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. – С. 373–375.
4. Абдрахманов Р.С. Развитие энергетики на возобновляемых гидрометеорологических ресурсах. Инновационное образование: проблемы, поиски, решения. Материалы IV междунар. науч.-метод. конф. / под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. – С. 370–372.
5. Абдрахманов Р.С. Эффективность использования ветроэнергетических ресурсов северных регионов и Дальнего Востока России для выработки электроэнергии. Тез. стенд. докл. междунар. конф. по проблемам гидрометеорологической безопасности (прогнозирование и адаптация общества к экстремальным климатическим изменениям). – М.: Триада ЛТД, 2006. – С. 107.
6. Абдрахманов Р.С., Зимняков С.А., Нурулина Л.Т., Тимербаева Э.М. Перспективы использования современных ветроэнергетических генерирующих комплексов в Приморском крае и Сахалинской области. Электронный вариант доклада: Сб. тез. IX симп. «Электроэнергетика 2030. Перспективы технологии электроэнергетики». Московская обл., 2007. – С. 296–297.
7. Абдрахманов Р.С., Назмеев Ю.Г. Оптимизация типов ВЭУ для выработки электроэнергии на территории Волжского бассейна // Проблемы энергетики. – 2000. – № 9–10. – С. 70–81.
8. Абдрахманов Р.С., Назмеев Ю.Г., Ахмеров Б.И. Перспективы использования газогенераторных электростанций на древесном топливе в условиях Татарстана // РНСЭ, 10–14 сентября 2001: Материалы докл. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2001. – Т. II. – С. 300–303.

9. Абдрахманов Р.С., Назмеев Ю.Г., Мозжерин В.И., Ахмеров Б.И. Перспективы развития малой гидроэнергетики на территории Татарстана: Материалы докл. 2-го междунар. симп. ЭЭЭ-2. – Казань: Казан. фил. МЭИ, 1998. – С. 150–152.

10. Абдрахманов Р.С., Назмеев Ю.Г., Якимов А.В. Об эффективности использования ветроэнергетики в районах Российской Федерации с умеренными скоростями ветра // Известия АН, Энергетика. – 2001. – № 5. – С. 93–102.

11. Абдрахманов Р.С., Назмеев Ю.Г., Якимов А.В. Эффективность ветроэнергетических станций в климатических условиях Северной Америки, Западной Европы и России // РНСЭ, 10-14 сентября 2001: Материалы докл. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. 2001. – Т. II. – С. 264–278.

12. Абдрахманов Р.С., Нурулина Л.Т., Тимербаева Э.М. Анализ методик оценки эксплуатационных параметров ВЭУ при известных характеристиках ветра. Энерго- и ресурсоэффективность в энергобезопасности России: Пленарные докл., материалы юбил. междунар. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2007. – С. 56–58.

13. Абдрахманов Р.С., Переведенцев Ю.П. Возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1992.

14. Абдрахманов Р.С., Переведенцев Ю.П. Об эффективности использования ветроэнергетических ресурсов для выработки электроэнергии // Метеорология и гидрология, – 1994. – № 12. – С. 92–97.

15. Абдрахманов Р.С., Переведенцев Ю.П. Определение эксплуатационных показателей ветроэнергетических установок. Метод. указания к практическим занятиям по курсу «Прикладная климатология» – Казань: КГУ, 1992.

16. Абдрахманов Р.С., Якимов А.В. Об эффективности использования ветроэнергетических ресурсов для выработки электроэнергии в Магаданской области и на Дальнем Востоке // Проблемы энергетики. – 1999. – № 9–10. – С. 93–101.

17. Абдрахманов Р.С., Якимов А.В., Бакина И.А. Определение эксплуатационных показателей ветроэнергетических установок и биогазогенераторов. Лабор. работы № 1–2 по курсу «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии». – Казань: КГЭИ, 2000.

18. Абдрахманов Р.С., Якимов А.В. и др. Эффективность крупных ветроэлектрических генерирующих комплексов в условиях Дальнего Востока России. Возобновляемая энергетика 2003: состояние, проблемы, перспективы: Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Елистратова. – СПб.: Изд-во СПб ГПУ, 2003. – С. 306–309.

19. Безруких П.П., Безруких П.П. Состояние и тенденции развития ветроэнергетики мира // Электрические станции. – 1998. – № 10. – С. 58–64.
20. Городецкий О.А., Гуральник И.И., Ларин В.В. Метеорология, методы и технические средства наблюдений. – Л.: Гидрометеиздат, 1984.
21. Зысин Л.В., Кошкин Н.Л., Финкер Ф.З. Вопросы энергетического использования биомассы отходов лесопроизводства // Теплоэнергетика. – 1994. – № 11. – С. 30–35.
22. Использование волновой энергии // В.И. Виссарионов, В.В. Волшаник, Л.А. Золотов, С.В. Кривенкова, Н.К. Малинин, Б.Е. Монахов; под ред. В.И. Виссарионова. – М.: МЭИ, 2002. – 144 с.
23. Константинов В.Н., Абдрахманов Р.С. Выбор ВЭУ и оценка их производительности // Проблемы энергетики. – 2005. – № 11–12. – С. 48–52.
24. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. – Л.: Гидрометеиздат, 1988.
25. Оборудование нетрадиционной и малой энергетики: Справочник-каталог. – 2-е изд. – Подгот. АО «Новые и возобновляемые источники энергии». – М., 2000.
26. Панцхава Е.С., Пожарнов В.А., Майоров Н.И., Школа И.И. Биогазовые технологии и решения проблем биомассы и «парникового эффекта» в России // Теплоэнергетика. – 1999. – № 2. – С. 30–39.
27. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких, Ю.Д. Арбузов, Г.А. Борисов, В.И. Виссарионов, В.М. Евдокимов, Н.К. Малинин, Н.В. Огородов, В.Н. Пузаков, Г.И. Сидоренко, А.А. Шпак; под общ. ред. П.П. Безруких. – СПб.: Наука, 2002.
28. Росс Д. Энергия волн. – Л.: Гидрометеиздат, 1981.
29. Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики: Пер. с англ. / С. Фонаш, А. Ротворф, Л. Казмерски и др.; Под ред. Т. Коутса, Дж. Микина. – М.: Мир, 1988.
30. Справочник по климату СССР. Вып. 1. Ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.
31. Справочник по климату СССР. Вып. 17. Ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.
32. Справочник по климату СССР. Вып. 24. Ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.
33. Справочник по климату СССР. Вып. 25. Ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.
34. Справочник по климату СССР. Вып. 33. Ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1968.

35. Справочник по климату СССР. Вып. 26. Ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.

36. Справочник по климату СССР. Вып. 27. Ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.

37. Справочник по климату СССР. Вып. 34. Ч. III. Ветер. – Л.: Гидрометеиздат, 1968.

38. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

39. Федоров Л.Г., Маякин А.С., Москвичев В.Ф. Теплоэлектростанция на альтернативном виде топлива (твердые бытовые отходы) // Энергосбережение. – 2002. – № 2. – С. 39–41.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список обозначений .....	3
Введение .....	9
<b>Глава 1. Основные направления развития нетрадиционной энергетики .....</b>	<b>11</b>
1.1. Основные определения и терминология .....	11
1.2. Перспективы возобновляемой энергетики .....	12
<b>Глава 2. Ветроэнергетика .....</b>	<b>15</b>
2.1. Введение .....	15
2.2. Классификация ВЭУ .....	16
2.3. Климатические ресурсы ветра .....	18
2.4. Преобразование энергии ветра .....	20
2.5. Физические основы ветроэнергетики .....	20
2.6. Использование установленной мощности .....	22
2.7. Эксплуатационные показатели ВЭУ .....	22
2.8. Уровень надежности ветроагрегатов .....	24
2.9. Анализ методик оценки эксплуатационных параметров ВЭУ при известных характеристиках ветра .....	26
2.10. Разработка технологии возобновляемой энергии в условиях арк- тических островов, побережья морей и внутренних ветровых районов .....	30
<b>Глава 3. Гидроэнергетика .....</b>	<b>41</b>
3.1. Введение .....	41
3.2. Активные гидротурбины .....	42
3.3. Реактивные турбины .....	43
3.4. Перспективы развития малой гидроэнергетики на территории РТ .....	44
<b>Глава 4. Биоэнергетика .....</b>	<b>47</b>
4.1. Введение .....	47
4.2. Получение биогаза в биогазогенераторах .....	47
4.3. Биогазовые установки .....	50
4.4. Виды биомассы .....	51
4.5. Характеристики древесного топлива .....	52
4.6. Оборудование для переработки древесного топлива .....	54
4.7. Эффективность малых ТЭС на древесном топливе в РТ .....	54
4.8. Особенности применения ТБО в энергетике .....	55
<b>Глава 5. Гелиоэнергетика .....</b>	<b>58</b>
5.1. Нагревание солнечным излучением воды и воздуха .....	58

5.2. Солнечное тепловое оборудование . . . . .	60
<b>Глава 6. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии . . . .</b>	<b>63</b>
6.1. Введение . . . . .	63
6.2. Поглощение фотонов . . . . .	64
6.3. Потребляемая солнечная энергия . . . . .	67
6.4. Фотоэлектрические свойства цепи и нагрузки . . . . .	69
<b>Глава 7. Геотермальная энергия. Энергия океана, приливов и волн .</b>	<b>74</b>
7.1. Введение . . . . .	74
7.2. Внутреннее строение Земли. Три класса геотермальных районов .	74
7.3. Виды ресурсов и запасов геотермальной энергии . . . . .	76
7.4. Анализ свойств сухих горных пород . . . . .	77
7.5. Использование геотермальных ресурсов . . . . .	79
7.6. Преобразование тепловой энергии океана . . . . .	82
7.7. Энергия приливов . . . . .	82
7.8. Энергия волн . . . . .	82
<b>Глава 8. Содержание практических занятий . . . . .</b>	<b>85</b>
Библиографический список . . . . .	90

*Учебное издание*

**Абдрахманов Равиль Салихович,  
Зимняков Сергей Андреевич**

**НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ  
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Учебное пособие  
по курсу  
«Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»

(Кафедра электрических станций КГЭУ)

Редактор издательского отдела *Н.А. Артамонова*  
Компьютерная верстка *Н.А. Артамоновой*

Изд. лиц. ИД № 03480 от 08.12.00. Подписано в печать 22.11.2007.  
Формат 60x84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.  
Физ. печ. л. 6,0. Усл. печ. л. 5,9. Уч.-изд. л.6,2.  
Тираж 3000 экз. Заказ № 3069

Издательский отдел КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51  
Типография КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51