Библиотека СОК

31.15
Т 49

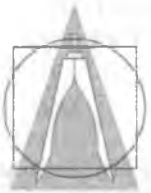
ССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



А. Тлеуов

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



А. Тлеуов

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

Рекомендовано Министерством образования и науки Республики Казахстан для организаций технического и профессионального образования

КОСТАНАЙ ӘЛЕУМЕТТІК-ТЕХНИКАЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІ
КІТАПХАНА
БИБЛИОТЕКА
КОСТАНАЙСКИЙ СОЦИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
-347870-

Издательство «Фолиант»
Астана-2009

УДК 620
ББК 31.15
Т 49

Рецензенты:
Пястолова И.А. – кандидат технических наук, доцент;
Куценко Т.И. – преподаватель специальных дисциплин высшей категории;
Ехласова М.К – преподаватель специальных дисциплин высшей категории

Т 49 **Тлеуов А.Х.**
Нетрадиционные источники энергии: *Учебное пособие.* – Астана: Фолиант, 2009. – 248 стр.

ISBN 9965-35-674-2

В предлагаемом учебном пособии излагаются основные научные и практические положения использования возобновляемых источников энергии; основы метеорологии; характеристики солнечного излучения и ветровых потоков, их устройства; методические положения расчета гелиосистем и ветроустановок, которые могут быть полезны для определения возможностей эффективного применения подобных систем и установок.

Данное учебное пособие предназначено для учащихся организаций технического и профессионального образования, а также может быть использовано студентами вузов технических специальностей.

Т $\frac{2201000000}{00(05)\text{-}09}$ УДК 620
ББК 31.15

ISBN 9965-35-674-2

© Тлеуов А.Х., 2009
© Издательство «Фолиант», 2009

ВВЕДЕНИЕ

Исходя из природно-климатических условий Казахстана, особенностей ведения сельскохозяйственного производства, можно рекомендовать для улучшения условий энергоснабжения, особенно для удаленных от источников энергоснабжения и имеющих нагрузки в пределах 10-100 кВт потребителей, использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. В качестве таких источников энергии на территории Казахстана следует рассматривать энергию солнечной радиации и ветра, малых рек и горных ручьев, использование отходов сельскохозяйственного производства для получения горючего биогаза, геотермальной энергии.

В Казахстане климатические условия позволяют широко использовать энергию Солнца и энергию ветровых потоков. Продолжительность солнечного сияния в течение года примерно одинакова по всем регионам и составляет 4000-5000 часов. Суммарная солнечная радиация изменяется от севера к югу с 4200 до 5500 МДж/м. Эффективное излучение изменяется от 1500 до 2100 МДж/м. В зимние месяцы отраженная радиация составляет 70-80% , снижаясь в летние месяцы до 20-30% .

По численным значениям среднегодовых скоростей ветра обычно принято судить о возможном количестве энергии ветра, протекающей в том или ином районе в течение года, и, соответственно, о возможности эффективного использования ветровых установок.

Согласно данным исследований, применение ветроустановок считается оправданным, если среднегодовые значения скорости ветра превышают 3-4 м/с. При меньших значениях эффективно использовать ветромеханические установки (прямое преобразование энергии ветровых

потоков в механическую энергию), а при скоростях ветра, превышающих 5 м/с, становится эффективным применение ветроэнергетических установок (получение электрической энергии). Результаты исследований показывают, что средняя скорость ветра по территории Казахстана имеет тенденцию уменьшения: с севера на юг – от 5 м/с до 2 м/с и с запада на восток – от 6 м/с до 3 м/с.

В зимние и осенние месяцы для северного, западного и восточного регионов среднемесячные скорости ветра значительно превышают соответствующие значения в летние месяцы, а также среднегодовое значение скорости ветра. Для южного региона республики отличительной особенностью является то, что средняя скорость ветра в летние месяцы превышает скорость ветра в зимние месяцы и его среднегодовое значение.

Биогаз в сельской местности можно использовать для выработки электроэнергии, отопления, получения горячей воды, в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. Отходы животноводства представляют интерес с точки зрения их использования для получения биогаза и энергии только в том случае, если животные находятся в закрытых помещениях. В этом случае имеется возможность экономически оправданного сбора навоза с минимальным или полным отсутствием грязевых примесей. Большое количество грязи, присутствующее в навозе, приводит к резкому снижению выхода при биогазификации.

Таким образом, в условиях Казахстана, где наибольшее распространение получила стойлово-отгонная система содержания, при определении общего количества навоза, пригодного для переработки, необходимо в расчет брать только время содержания животных в закрытых помещениях.

Основные запасы геотермальной энергии располагаются в южном и восточном регионах Казахстана, а также рациональное использование мини-ГЭС возможно в горных и предгорных районах этих же регионов.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АВЭУ – автономная ветроэнергетическая установка;
ВА – ветроагрегат;
ВЭС – ветроэлектрическая станция;
ВЭУ – ветроэлектрическая установка;
ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
ВМУ – ветромеханическая установка;
ВУ – ветроустановка;
ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция;
ГеоТЭС – геотермическая электростанция;
КСЭ – коллектор солнечной энергии (плоский);
НВИЭ – невозобновляемые источники энергии;
ОТЭС – океаническая термоградиентная электростанция;
СТС – солнечная система теплоснабжения;
СЭС – солнечная электростанция;
СТЭС – солнечно-топливная электростанция;
ФЭП – фотоэлектрический преобразователь;
ФЭС – фотоэлектрическая станция;
ФЭУ – фотоэлектрическая установка.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

1.1. Условия эффективного использования НВИЭ

При выяснении возможности использования энергии от установок, работающих на возобновляемой энергии, необходимо ответить на три основных вопроса:

1. Чему равны энергоресурсы потенциальных источников возобновляемой энергии?

2. Каковы цели использования производимой энергии?

3. Какова стоимость производимой энергии по сравнению с энергией от других источников?

Последний вопрос является важнейшим для потребителей энергии и в конечном итоге является решающим при практическом использовании возобновляемых энергоресурсов. Необходимо ясно себе представлять, что экономически оправданная эксплуатация возобновляемых источников энергии возможна только при выполнении двух условий:

1. Четко понятны принципиальные преимущества использования таких источников энергии.

2. Максимально эффективен весь процесс преобразования возобновляемой энергии в энергоустановках благодаря минимизации потерь и максимизации экономических и социальных показателей.

При выполнении этих двух условий можно проводить сравнительные стоимостные расчеты применительно к конкретной установке и делать экономические оценки.

Невыполнение первого условия приводит, как правило, к технически несовершенным решениям и, как следствие, к низким экономическим показателям. Отчасти это

связано с теми большими различиями в методах решения задач, которые используются в энергетике на возобновляемых ресурсах, с одной стороны, и в традиционной тепловой и атомной энергетике – с другой стороны.

Потребность в освоении и развитии энергетики на возобновляемых ресурсах становится все более актуальной при возрастающем спросе на топливо, особенно на нефть, росте населения и требований к уровню жизни и изменениями в экологической ситуации на Земле.

Такой прирост производства энергии трудно обеспечить без использования новых источников энергии, так как при возрастающей потребности в энергии запасы топлива истощаются. Независимо от отношения к атомной энергетике энергетические программы всех стран содержат, как правило, два основных пункта, направленных на улучшение обеспечения энергией:

1) развитие энергетики на возобновляемых источниках энергии;

2) повышение эффективности использования производимой и потребляемой энергии.

1.2. Основные понятия и определения

Все источники энергии можно разделить на два класса.

1. *Возобновляемые источники энергии* – это источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Типичный пример – солнечное излучение с характерным периодом повторения в 24 ч. Возобновляемая энергия присутствует в окружающей среде в виде энергии, не являющейся следствием целенаправленной деятельности человека, и это является ее отличительным признаком.

2. *Невозобновляемые источники энергии* – это природные запасы вещества и материалов, которые могут быть использованы человеком для производства энергии. Это, к примеру, ядерное топливо, уголь, нефть, газ. Энергия невозобновляемых источников, в отличие от возоб-

новляемых, находится в природе в связанном состоянии и высвобождается в результате целенаправленных действий человека.

Смысл данных определений можно пояснить схемами на рис. 1.1.



Рисунок 1.1. *Схемы процессов использования возобновляемой и невозобновляемой энергии: А, Б, В – неиспользуемый поток возобновляемой энергии; Г, Д, Е – используемый поток энергии*

В таблице 1.1. приведены сравнительные характеристики традиционных энергетических установок и установок на возобновляемых источниках энергии.

Существует 5 основных источников энергии:

1) солнечное излучение;

2) движение и притяжение Солнца, Луны и Земли;

3) тепловая энергия ядра Земли, а также химических реакций и радиоактивного распада в ее недрах;

4) ядерные реакции;

5) химические реакции различных веществ.

Таблица 1.1

Характеристики энергосистем на возобновляемых и истощаемых источниках энергии

Характеристика энергосистемы	На ВИЭ	На истощаемых источниках энергии
1. Примеры источника	Ветер, солнце, приливы	Уголь, нефть, газ
2. Местонахождение	Окружающая природная среда	Сосредоточенные месторождения
3. Естественная форма существования	Потоки энергии	Потенциальная связанная энергия
4.Начальная интенсивность	Низкая интенсивность, рассеянная энергия с плотностью 300 Вт/ м^2 и меньше	Высокая интенсивность до 100 кВт/ м^2 и выше
5. Время истощения	Бесконечное	Конечное
6.Стоимость потребляемой энергии	Бесплатно	Непрерывно возрастает (более 0,01 долл. за 1 кВт- ч
7.Стоимость оборудования	Высокая, примерно 2000 долл. за 1 кВт установленной мощности	Средняя, примерно 500 долл. за 1 кВт
8.Стабильность и управляемость	Стабильность выходной мощности низкая, лучший метод управления – управление нагрузкой с прямой связью	Стабильность высокая, лучший метод управления - управление расходом с обратной связью
9.Ограничения для использования	Особенности местных условий и спроса на энергию	Без ограничений
10. Размеры	Небольшие системы экономичны, в больших возникают трудности	Крупные системы обычно предпочтительнее
11.Научные основы использования источников	Широкий диапазон различных областей науки и техники, в т.ч. биологической и сельскохозяйственной науки	Узкий диапазон, в основном электротехника и механика
12.Области применения	Сельскохозяйственное производство	Промышленность
13.Безопасность эксплуатации	Во время работы есть опасные зоны, в выключенном состоянии – обычно безопасны	Без специальных мер защиты опасность высокая, особенно при холостом режиме
14.Автономность	Самообеспечены источниками энергии	Зависят от поставок топлива
15.Влияние на окружающую среду	Обычно небольшое, особенно на небольших установках	Как правило, окружающая среда загрязняется, особенно воздух и вода

Источники 1-3 являются источниками возобновляемой энергии. Источниками невозобновляемой энергии являются 1 (топливо на основе окаменелых органических соединений), 3 (горячие горные породы), 4 и 5.

Окружающее нас пространство непрерывно пронизывается потоками энергии от различных источников. На рис. 1.2 представлена схема, поясняющая это воздействие.



Рисунок 1.2. *ВИЭ и их использование (числа обозначают мощность источника)*

Возможность использования того или иного источника возобновляемой энергии очень сильно зависит от местных условий. Получается, что энергетика на возобновляемых источниках должна ориентироваться прежде всего на местные природные особенности.

При исследовании возможностей использования возобновляемых источников энергии необходимо иметь ясное представление о структуре используемых источников энергии и потребителях этой энергии. К примеру, необходимо иметь представление, какое количество энергии получают в данном регионе от тепловых, гидро- и иных источников энергии, характеристики и уровень

потребления различных видов энергии потребителями, цели расходования получаемой энергии и т.д.

Принципы планирования энергетики. При планировании энергетики следует придерживаться следующих принципов.

1. Совершенная энергетическая система должна наиболее полно учитывать особенности источников энергии и ее потребителей. К сожалению, о потребителе часто забывают, и поэтому оказываются плохо увязанными его потребности и возможности источников энергии. Это приводит к неэкономному расходованию энергии и ее потерям. Например, если большая часть энергии в быту расходуется на отопление и нагрев воды, то неразумно использовать для этих целей электроэнергию тепловых электростанций, теряя очень много тепла при выработке электроэнергии, чтобы затем снова превратить ее в тепло. В этом случае более экономичным может оказаться непосредственное снабжение потребителя теплом. На этом основан принцип комбинированного энергоснабжения, реализуемый, например, на ТЭЦ.

2. Расчеты, использующие эффективность, или коэффициент полезного действия энергетической системы, наиболее полно раскрывают ее возможности и позволяют избежать ненужных потерь энергии. Под эффективностью, или КПД, системы здесь понимается отношение полезной энергии на выходе системы ко всей энергии, затраченной на ее производство.

Более совершенная энергетическая система будет, как правило, более экономически выгодной, несмотря на большие удельные капитальные затраты, вследствие меньшего расхода топлива и большего срока службы оборудования, особенно электроламп.

3. Повышение эффективности энергосистемы и экономических показателей ее работы во многом зависит от искусства управления ею. Ни при каком источнике энергия не достается даром, и на практике энергия возобновляемых источников обычно гораздо дороже, чем принято считать, поэтому никогда не могут быть оправданы бесполезные ее затраты.

1.3. Научные принципы использования ВИЭ

Из вышеприведенных определений возобновляемых и истощаемых источников энергии видно принципиальное различие между ними, поэтому эффективно использовать возобновляемые источники энергии можно только на основе научно разработанных принципов использования этой энергии.

Анализ возобновляемых энергоресурсов. Очень важно установить, что в окружающем нас пространстве всегда существуют потоки возобновляемой энергии, и энергетика на возобновляемых источниках энергии должна ориентироваться только на уже существующие энергоресурсы, а не ставить себе целью создание новых. Прежде чем развивать энергетику на возобновляемых источниках, необходимо точно определить их мощность. Это требует регулярных и длительных наблюдений и анализа параметров этих источников. Вначале необходимо оценить ресурс того или иного вида возобновляемой энергии, а уже потом ту его часть, которая может быть использована в энергоустановках.

Временные характеристики возобновляемых источников энергии. Потребность в энергии, как правило, непостоянна во времени. Например, потребность в электроэнергии максимальна в утренние и вечерние часы и минимальна в ночное время. Традиционные тепловые электростанции могут подстраиваться под эти колебания спроса на энергию, регулируя расход топлива. При использовании же возобновляемых источников энергии колеблется не только спрос на энергию, но и мощность этих источников, поэтому работающие на этих источниках электроустановки должны учитывать оба эти фактора, которые часто противоречат друг другу.

В таблице 1.2 представлены основные параметры, определяющие мощность различных источников возобновляемой энергии и характерные периоды ее флуктуаций,

которые, впрочем, могут очень сильно зависеть от местных особенностей. Источники энергии в этой таблице расположены в порядке возрастания регулярности колебаний их мощности: от крайне нерегулярных (ветер) до строго регулярных (приливы). Регулярность солнечной энергии очень сильно зависит от географического положения.

Качество источника энергии. О качестве источника энергии говорят часто, но, как правило, не поясняют, что же это такое. Мы под качеством источника энергии будем понимать долю энергии источника, которая может быть превращена в механическую работу. Например, электроэнергия обладает высоким качеством, так как с помощью электродвигателей более 95 % ее можно превратить в механическую работу. Качество тепловой энергии, выделяющейся при сжигании топлива на традиционных ТЭЦ, довольно низкое, потому что только около 30 % теплотворной способности топлива превращается в конечном счете в механическую работу. По этому признаку возобновляемые источники энергии можно разделить на три группы.

1. Источники механической энергии, например, гидро- и ветроисточники, волновые и приливные. В целом качество этих источников энергии высокое, и они обычно используются для производства электроэнергии. Качество ветровой энергии – обычно порядка 30 %, гидроэнергии – 60 %, волновой и приливной – 75 %.

2. Тепловыми возобновляемыми источниками энергии являются, например, биотопливо и тепловая энергия Солнца. Максимальная доля тепла таких источников, которая может быть превращена в механическую работу, определяется вторым законом термодинамики. На практике превратить в работу удается примерно половину тепла, допускаемого вторым законом. Для современных паровых турбин эта величина (качество тепловой энергии) не превышает 35 %.

Таблица 1.2

Интенсивность и периодичность действия возобновляемых источников энергии

Источник	Периодичность	Определяющие параметры	Энергетические соотношения	Примечание
Прямое солнечное излучение	24 ч, 1 год	Облученность ($Вт/м^2$). Угол падения излучения	$P \approx G_n \cos\theta$ Максимум 1 $кВт/м^2$	Только в дневное время
Рассеянное солнечное излучение	24 ч, 1 год	Облачность	$P \leq G$; $P \leq 300$ $Вт/м^2$	Энергия значительна
Биотопливо	1 год	Качество почвы, облученность, вода, специфика топлива, расходы	Связанная энергия 10 МДж /кг	Очень много видов топлива, источники — лесное и сельское хозяйства
Ветер	1 год	Скорость ветра, высота над земной поверхностью	$P \approx v^3$	Флуктуирует
Волны	1 год	Амплитуда волны H, ее период T	$P \approx H_s^2 T$	Высокая плотность энергии (50 кВт/м)
Гидроэнергия	1 год	Напор H, объемный расход воды Q	$P \approx HQ$	Искусственно создаваемый источник
Приливы	12 ч 25 мин	Высота прилива R, площадь бассейна A, длина эстуария L, глубина эстуария h	$P \approx R^2 A$	Увеличение высоты прилива, если $L/\sqrt{h}$ имеет значение 36400 $м^{0.5}$
Тепловая энергия	Постоянные параметры	Разность температуры воды на поверхности и на глубине ΔT	$P \approx (\Delta T)^2$	Ряд районов в тропиках. Низкая эффективность преобразования энергии

3. Источники энергии на основе фотонных процессов, к которым относятся источники, использующие фотосинтез и фотоэлектрические явления. Например, с помощью фотоэлектрических преобразователей солнечное излучение определенной частоты можно с высокой эффективностью преобразовать в механическую работу. Добиться высокой эффективности преобразования энергии во всем спектре солнечного излучения очень трудно, и на практике КПД фотопреобразователей, равный 15 %, считается хорошим.

Рассеянная энергия, или энергия низкой плотности. Возобновляемые и истощаемые источники энергии очень сильно различаются по характерной для них начальной плотности потоков энергии. Для возобновляемых источников энергии эта величина – порядка 1 кВт/м^2 (например, плотность потока энергии солнечного излучения, ветра при скорости около 10 м/с), для невозобновляемых источников она на несколько порядков выше. Например, тепловая нагрузка в трубах паровых котлов – порядка 100 кВт/м^2, а в теплообменниках ядерных реакторов – несколько мегаватт на 1 м^2. Потребители энергии, за редким исключением, используют у себя гораздо меньшие плотности потоков энергии.

Из-за большого различия в плотности потоков энергии в энергоустановках на возобновляемых и невозобновляемых источниках вторые эффективны при большой единичной мощности установки, но при этом распределение энергии среди потребителей требует больших затрат. Первые же эффективнее при небольшой единичной мощности, но большие затраты требуются уже для повышения мощности за счет объединения таких установок в единую энергосистему.

Использование возобновляемых энергоресурсов, как показала практика, ускоряет экономическое развитие сельских районов, и данная энергетика в силу своей специфики соответствует сельскому укладу жизни, а не городскому.

Комплексный подход в планировании энергетики на возобновляемых ресурсах. Возобновляемые источники энергии являются неотъемлемой частью окружающей

нас среды, и их изучение не может ограничиваться рамками какой-то одной научной дисциплины, скажем, физики или электротехники. Часто рамки исследований охватывают область от промышленной биотехнологии до электроники и процессов управления.

Прекрасным примером комплексного планирования являются некоторые агропромышленные предприятия. Отходы животноводства и растениеводства могут служить сырьем для производства метана, а также жидкого и твердого топлива, а все в целом – для производства удобрений и высокоэффективного ведения сельского хозяйства.

Определяющая роль конкретной ситуации. Ни один источник возобновляемой энергии не является универсальным, подходящим для использования в любой ситуации. Это всегда определяется конкретными природными условиями и потребностями общества, т.е. конкретной ситуацией. Поэтому для эффективного планирования энергетики на возобновляемых ресурсах необходимы, во-первых, систематические исследования окружающей среды, аналогичные геологическим исследованиям при поиске нефти, во-вторых, изучение потребностей конкретного региона в энергии для промышленного, сельскохозяйственного производства и для бытовых нужд. В частности, необходимо знать структуру потребителей энергии, чтобы выбирать наиболее экономичный источник энергии. В этом отношении энергетика на возобновляемых ресурсах подобна сельскохозяйственному производству, в котором рентабельность возделывания той или иной культуры зависит от качества почвы, природных условий и рыночного спроса на нее. Например, солнечные энергетические установки на юге Казахстана должны быть совсем не такими, как на севере республики.

Характерный размер района, в рамках которого разумно планировать энергетику на возобновляемых источниках, – порядка 250 км, и существенно увеличить его не представляется возможным. К сожалению, современное урбанизированное и индустриальное общество плохо приспособлено к такому многовариантному использованию возобновляемой энергии.

1.4. Технические проблемы использования возобновляемых источников энергии

Мониторинг окружающей среды. В основе решения об использовании ВИЭ обычно лежат результаты многолетних наблюдений (мониторинга) за состоянием окружающей среды в данном районе. При этом очень важно, чтобы получаемая в процессе мониторинга информация включала все параметры, необходимые для разработки конкретной энергетической системы. Частично такую информацию содержат результаты метеорологических наблюдений, но расположение метеостанций очень часто не совпадает с местом предполагаемого размещения энергоустановок, и методы регистрации и анализа метеоданных не полностью соответствуют рассматриваемой задаче. Но тем не менее данные метеостанций могут служить базой для проведения сравнительного анализа с результатами целевого мониторинга. Так, например, сравнивая результаты измерения скорости ветра в течение нескольких месяцев в месте предполагаемого размещения ветроустановки с данными ближайшей метеостанции, можно, опираясь на метеоданные за более длительный период, экстраполировать и результаты мониторинга скорости ветра.

Значительно сложнее проводить оценку ВИЭ, в основу которой не могут быть положены стандартные метеоданные. В этом случае необходимы специальные методы измерений и соответствующие приборы, что требует значительных людских и материальных ресурсов. Но в любом случае, опираясь на имеющиеся данные из различных областей знаний, можно получить большую часть необходимой информации.

Потребители энергии и их характеристики. Производству энергии всегда должно предшествовать всестороннее изучение потребности в ней. Так как производство энергии всегда недешево и связано с нежелательными воздействиями на окружающую среду, очень важно расходовать ее эффективно и экономно.

КОСТАНАЙ ӨҢІРЛІК ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
КІТАПХАНА
БИБЛИОТЕКА
КОСТАНАЙСКИЙ СОЦИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
347870

В зависимости от характеристик потребителя или нагрузки во многом зависит выбор используемого источника энергии. Вкладывая средства в развитие энергетики, необходимо помнить, что повышать экономичность и эффективность потребителей, как правило, выгоднее, чем увеличивать производство энергии.

Согласование источников энергии и потребителей. После анализа характеристик потребителя и потенциальных источников возобновляемой энергии необходимо согласовать их друг с другом. Согласование предполагает выполнение следующих условий.

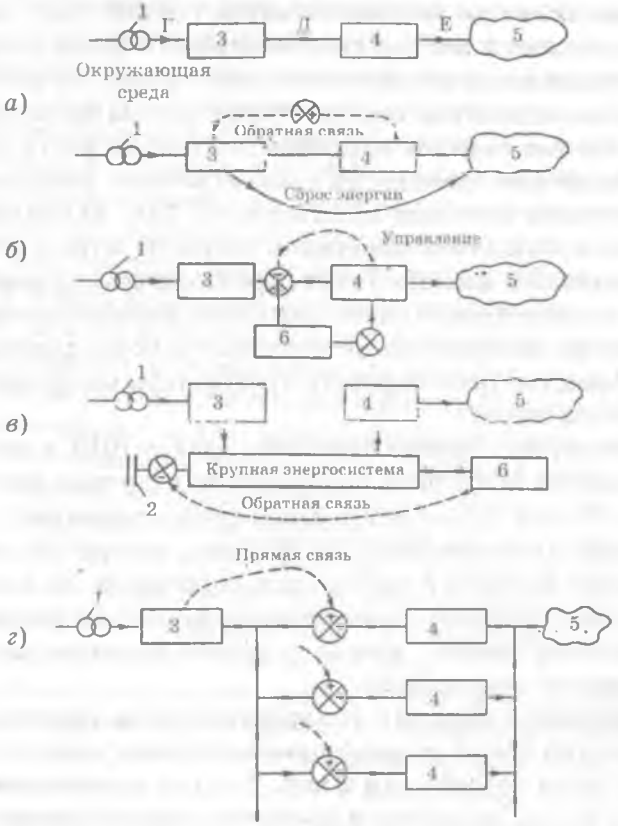


Рисунок 1.3. *Схемы согласования ВИЭ с потребителями*

1. Энергоустановка должна максимально эффективно использовать возобновляемую энергию. Сопротивления Г, Д и Е потоку энергии (рис. 1.3) должны быть минимальны. В этом случае будут сведены к минимуму энергетическое оборудование и его размеры.

2. Использование систем управления с отрицательной обратной связью между потребителем и источников энергии невыгодно, так как приходится сбрасывать в окружающую среду часть выработанной преобразователем энергии. Такое регулирование оправданно только в крайнем случае или когда удовлетворены все возможные потребители энергии. Неэффективность принципа регулирования с обратной связью в энергетических установках на возобновляемой энергии является следствием постоянного существования в окружающем пространстве потоков этой энергии. Для невозобновляемого источника энергии регулирование с обратной связью выгодно, так как уменьшает его расход.

3. Необходимо согласовать спрос и предложение на энергию (не завышая при этом мощность энергоустановки) за счет включения в энергосистему накопителей энергии. Долговременные качественные накопители энергии очень дороги.

4. Если согласовать энергоустановку на возобновляемой энергии с потребителями очень сложно, то от решения этой задачи отказываются. В этом случае установка должна дублироваться (потребитель подключается) более крупной и универсальной по составу источников энергии системой (например, энергосистемой).

5. Наиболее эффективна схема использования энергии возобновляемых источников энергии, когда к источнику подключается в каждый момент столько потребителей, чтобы суммарная нагрузка соответствовала текущей мощности источника возобновляемой энергии. При этом отдельные потребители могут, в свою очередь, иметь накопители энергии или подстраиваться под изменяющиеся параметры источника. В таких схемах используют регулирование с прямой связью.

Методы управления. Для согласования источников энергии с потребителями используются различные методы управления. В энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии можно использовать три метода управления, основанные на сбросе излишков энергии, аккумулировании энергии и изменении нагрузки. Эти методы могут быть реализованы различными способами применительно ко всей энергосистеме или ее частям.

1. *Система со сбросом излишков энергии.* Потоки энергии возобновляемых источников существуют постоянно, и если их не использовать, они будут безвозвратно потеряны. Тем не менее метод управления, основанный на сбросе излишков энергии может оказаться самым простым и дешевым. Такой метод управления используется, например, на ГЭС, в системах обогрева зданий солнечным излучением с управляемыми заслонками, в ВЭУ с изменяемым шагом.

2. *Система с накопителями (аккумуляторами) энергии.* Накопители могут аккумулировать энергию возобновляемых источников как в ее исходном (непреобразованном) виде, так и в преобразованном после энергоустановки виде. В первом случае управление запасами возобновляемой энергии такое же, как и запасами невозобновляемой энергии. Основной недостаток систем регулирования с такими накопителями – их относительно высокая стоимость, сложность использования в небольших энергоустановках и при реализации дистанционного управления.

Примеры таких накопителей: водохранилища (непреобразованный вид), аккумуляторные батареи, электролизные установки (преобразованный вид) и т.д. Такие накопители особенно выгодны на небольших по мощности энергоустановках. Тепловые накопители в настоящее время уже не актуальны.

3. *Системы с регулированием нагрузки.* Такие системы поддерживают соответствие между спросом и предложением энергии за счет включения и выключения необходимого числа потребителей. Такое регулирование может применяться в любых системах, но наиболее вы-

годно оно при наличии большого числа разнородных потребителей. Его преимущество при использовании в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии заключается в следующем:

– подключение или отключение потребителей в соответствии с располагаемой мощностью источника позволяет избегать потерь возобновляемой энергии;

– в многоканальной системе регулирования могут учитываться потребности различных потребителей и их приоритеты, при этом, например, потребители с низким приоритетом, которые отключаются первыми, могут снабжаться энергией по низкой цене или, например, нагревательные установки могут питаться непостоянным по величине напряжением;

– потребители, обладающие определенным аккумулирующим свойством (водонагревательные баки, кондиционеры), могут использовать это свое свойство, отключаясь в те периоды времени, когда энергия более дорогостоящая;

– в таких системах регулирования можно использовать надежные, точные, малоинерционные и недорогие электронные и микропроцессорные устройства.

Регуляторы с прямой связью особенно удобны для применения на автономных ВЭУ.

Помимо перечисленных выше проблем использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, необходимо также учитывать социально-экономические последствия развития энергетики на возобновляемых источниках энергии, такие как:

– рассредоточение населения;

– воздействие на окружающую среду;

– долговременные последствия.

ГЛАВА 2. РЕСУРСЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ И НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

2.1. Виды, основные направления использования НВИЭ и ВИЭ

Согласно представленным данным, различают четыре вида энергии: тепловую, химическую, механическую и световую. Соответственно каждому виду энергии приведены природный источник этого вида энергии и основные направления производства конечной энергии или результатов ее преобразования (табл. 2.1).

По аналогии с запасами органического топлива и ресурсами гидравлической энергии рек ресурсы НВИЭ целесообразно подразделять на следующие виды: потенциальные, технически реализуемые и экономически доступные.

Потенциальные ресурсы – общее количество энергии в окружающей человека среде, принципиально доступное для практического использования.

Технически реализуемые ресурсы – та часть потенциальных ресурсов, которая может быть использована для практических целей средствами современной технологии без существенного ущерба окружающей среде.

Экономически доступные ресурсы – та часть технически реализуемых ресурсов, освоение которых конкурентноспособно с альтернативными технологиями и обеспечено финансовыми, материальными и трудовыми ресурсами.

Потенциальные ресурсы НВИЭ столь велики, что по энергетическому эквиваленту в расчете на один год они многократно превышают суммарные запасы всех видов топлива в недрах Земли. Оценка мировых потенциальных ресурсов возобновляемых источников энергии дана в таблице 2.2.

Таблица 2.1

Виды и основные направления использования НВИЭ

Вид энергии	Природный источник энергии	Основные направления производства конечной энергии
1	2	3
Тепловая	Солнечное тепловое излучение.	Термодинамическое преобразование концентрированной солнечной энергии в механическую и электрическую. Производство тепловой энергии высокого, среднего и низкого потенциала. Термохимическое обогащение органического топлива.
	Физическое тепло солнечного излучения, аккумулированное в толще атмосферы. Термический градиент в толще атмосферы и водоемов. Глубинное тепло Земли.	Производство тепловой энергии низкого и среднего (с помощью тепловых насосов) потенциала водоемов и грунта. Термическое преобразование в механическую и электрическую энергию. Термическое преобразование в механическую и электрическую энергию. Производство тепловой энергии среднего и низкого потенциала.
Химическая	Продукты фотосинтеза (биомасса), в т.ч.: свежая растительная масса, продукты естественного химического разложения биомассы, органические отходы, городской и бытовой мусор.	Прямое сжигание с целью замещения ископаемых топлив с получением высокопотенциального тепла, которое может быть преобразовано в механическую и электрическую энергию, а также использовано в качестве тепловой энергии высокого, среднего и низкого потенциала. Качество исходного топлива может быть повышено за счет сепарации, сушки, измельчения, брикетирования, выделения вредных примесей, анаэробной ферментации, пиролиза, газификации, спиртового брожения, гидролиза и дистилляции.

1	2	3
Механическая	Ветер. Сосредоточенный перепад давлений в толще атмосферы или воды. Морские (ветровые) волны. Морские течения и течение воды в реках. Приливы и отливы. Морской прибой.	Преобразование в полезную механическую и электрическую энергию. Использование в качестве движителя судов. Преобразование в полезную механическую и электрическую энергию. То же.
Световая	Солнечное световое излучение, в т.ч.: – прямое – отраженное – рассеянное.	Рациональное использование вместо искусственного электрического освещения. Фотоэлектрическое преобразование. Фотохимические и фотобиологические каталитические процессы разложения воды с получением водорода. Искусственный фотосинтез.

Таблица 2.2

Оценка мировых потенциальных ресурсов ВИЭ

Виды ресурсов	Потенциальные ресурсы, Дж/г
Солнечная энергия	
На верхней границе атмосферы Земли	$5,7 \cdot 10^{24}$
На поверхности Земли	$1,5 \cdot 10^{24}$
На поверхности суши	$4,4 \cdot 10^{23}$
На поверхности Мирового океана	$1,1 \cdot 10^{24}$
Горючие возобновляемые энергоресурсы (биомасса)	
На суше	$1,3 \cdot 10^{21}$
В Мировом океане	$7,0 \cdot 10^{20}$
Органические отходы	$6,3 \cdot 10^{19}$
Глубинное тепло Земли (до 10 км)	
Геотермальный тепловой поток, достигающий поверхности земли	10^{20}
Гидротермальные ресурсы	$4,0 \cdot 10^{22}$
Петрогеотермальные ресурсы	10^{24}
Энергия ветра	$6,3 \cdot 10^{19}$
Энергия течения рек	$3,0 \cdot 10^{18}$
Энергия Мирового океана:	
Тепловая энергия (температурный градиент)	$3,4 \cdot 10^{20}$
Энергия океанических течений	$2,6 \cdot 10^{19}$
Энергия морских ветровых волн	$3,1 \cdot 10^{18}$
Энергия приливов	$6,3 \cdot 10^{19}$
Энергия прибоя	$1,2 \cdot 10^{18}$
Энергия градиентов солености	10^{18}

Наибольшее количество потенциальных ресурсов ВИЭ приходится на солнечную энергию. Причем в порядке убывания эти ресурсы располагаются в следующем порядке: верхняя граница атмосферы – поверхность Земли – поверхность Мирового океана – поверхность суши. Ослабление прихода солнечной радиации на поверхность Земли по сравнению с верхней границей атмосферы составляет 3,8 раза.

Соответственно, в настоящее время в основном человечество использует лишь какую-то часть потенциальных ресурсов солнечной энергии, которая поступает на поверхность суши.

В процентном отношении мировые потенциальные ресурсы ВИЭ распределяются следующим образом (по отношению к ресурсам солнечной энергии на границе атмосферы):

Горючие возобновляемые энергоресурсы (биомасса)	– 0,23 10-3 %
Глубинное тепло Земли (до 10 км)	– 0,18 %
Энергия ветра	– 1,1 10-5 %
Энергия течения рек	– 0,53 10-6 %
Энергия Мирового океана	– 0,6 10-4 %

Что касается технически реализуемых и экономически доступных ресурсов НВИЭ, то в настоящее время достаточной информации и надежных данных нет. Вместе с тем выполненные к настоящему времени исследования позволяют достаточно уверенно ранжировать все известные технически реализуемые технологии использования НВИЭ по следующим признакам:

1 – экономически доступные в настоящее время;

2 – экономически доступные в ближайшей (15-20 лет) перспективе;

3 – экономически доступные в обозримой (30-40 лет) перспективе;

4 – экономическая эффективность проблематична или возможна в отдаленной (более 40-50 лет) перспективе.

Основные направления и технологии использования НВИЭ приведены в таблице 2.3.

В зависимости от эффективности по срокам освоения технологии использования, типа энергетической установки и области применения ВИЭ, выделяют несколько следующих типов:

Экономически доступные в настоящее время:

1. Системы солнечного теплоснабжения для пассивного солнечного обогрева и активные системы с простейшими плоскими солнечными коллекторами для сезонного горячего водоснабжения и обогрева плавательных бассейнов.

2. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии для энергоснабжения автономных потребителей (для питания микроэлектронной и радионавигационной аппаратуры), для стационарного энергоснабжения космических летательных аппаратов.

3. Горючие возобновляемые энергоресурсы (биомасса и отходы).

4. ГеоТЭС.

5. Ветроэнергетика (в основном для энергоснабжения автономных потребителей).

6. Гидравлическая энергия рек.

Экономически доступные в ближайшей (15-20 лет) перспективе:

1. СЭС башенного типа для работы в энергосистемах (комбинированные СТЭС и СТЭС с внутрицикловой термохимической переработкой топлива).

2. Системы СТС для отопления и круглогодичного горячего водоснабжения, с суточным аккумулированием и электроподогревом в ночные часы.

3. Системы СТС с солнечными воздухоподогревателями (для отопления зданий и сооружений в сочетании с пассивными способами обогрева и для сушки сельхозпродуктов и технологического сырья).

4. ФЭП для стационарного энергоснабжения.

5. Крупные ветроагрегаты для ВЭС.

6. Приливные электростанции (ПЭС).

Экономически доступные в обозримой (30-40 лет) перспективе:

1. СЭС при совместной работе с другими источниками энергии.

2. СТС с суточным или недельным аккумулированием и теплонасосными установками.

3. СТС для холодоснабжения и кондиционирования воздуха.

4. Малые СКЭС для энергоснабжения космических технологий и работ в открытом космосе.

5. Энергия Мирового океана.

Экономическая эффективность проблематична или возможна в отдаленной (более 40-50 лет) перспективе:

1. Автономные СЭС.

2. СТС с сезонным аккумулированием.

3. ФЭП для работы в энергосистемах.

4. Крупные СКЭС для энергоснабжения наземных объектов.

Таблица 2.3

Основные направления и технологии использования НВИЭ

№ п/п	Технология использования, тип энергетической установки или область применения НВИЭ	Категории эффективности по срокам освоения			
		I	II	III	IV
1	2	3	4	5	6
	Солнечная энергетика				
	1. Солнечные теплоэнергетические установки				
	- СЭС башенного типа (работа в энергосистемах)	-	+	+	+
	- Комбинированные СТЭС				
	- СТЭС с внутрицикловой термохимической переработкой топлива	-	+	+	+
	- СЭС при совместной работе с ГЭС, ГАЭС, воздушно-аккумулирующими ЭС или ГеоТЭС	-	-	+	+
	- Автономные СЭС	-	-	-	+
	СЭС модульного типа (автономное энергоснабжение)				
	- с параболическим концентратором и высокими параметрами рабочего тела (более 500°С)	-	-	+	+
	- с параболоцилиндрическими концентраторами и средними параметрами рабочего тела	-	-	+	+
	- с плоскими солнечными коллекторами и низкокипящими рабочими телами	-	-	-	+
	Системы СТС				
	1. Системы пассивного солнечного обогрева	+	+	+	+
	2. Активные системы СТС с простейшими плоскими солнечными коллекторами				
	- для сезонного горячего водоснабжения	+	+	+	+
	- для обогрева плавательных бассейнов	+	+	+	+

1	2	3	4	5	6
	3. Активные системы СТС с усовершенствованными солнечными коллекторами (с селективным покрытием, ваккумированными и фокусирующими)				
	– для отопления и круглогодичного горячего водоснабжения – комбинированные солнечно–топливные	–	+	+	+
	– с суточным аккумулированием и электроподогревом в ночные часы (после введения двухставочного тарифа на электроэнергию)	–	+	+	+
	– с суточным или недельным аккумулированием и теплонасосными установками	–	–	+	+
	с сезонным аккумулированием	–	–	–	+
	В сочетании с солнечными прудами	–	–	–	+
	Для холодоснабжения и кондиционирования воздуха				
	Адсорбционные холодильные установки	–	–	+	+
	Комбинированные установки для производства тепла в зимнее время и холода – в летнее	–	–	+	+
	4.Системы СТС с солнечными воздухоподогревателями				
	Для отопления зданий и сооружений в сочетании с пассивными способами обогрева	–	+	+	+
	Для сушки сельскохозяйственных продуктов и технологического сырья	–	+	+	+
	ФЭП Энергоснабжение автономных потребителей				
	Источники питания для микроэлектронной аппаратуры	+	+	+	+
	Низковольтные энергоисточники для питания радионавигационной аппаратуры	+	+	+	+
	Стационарное энергоснабжение	–	+	+	+
	Для работы в энергосистемах	–	–	–	+
	Рациональное использование солнечного света				
	За счет архитектурно–планировочных решений	+	+	+	+
	За счет перевода стрелки часов в летнее время	+	+	+	+
	За счет внедрения щелевых световодов	–	+	+	+
	За счет внедрения волоконно–оптических световодов	–	–	+	+

1	2	3	4	5	6
	СКЭС и установки				
	Применение ФЭП для стационарного энергоснабжения космических летальных аппаратов	+	+	+	+
	Орбитальные установки для освещения отдельных участков поверхности Земли	–	+	+	+
	Малые СКЭС для энергоснабжения космических технологий и работ в открытом космосе	–	–	+	+
	Крупные СКЭС для энергоснабжения наземных объектов	–	–	–	+
	Горючие возобновляемые энергоресурсы				
	I. Сухая биомасса				
	Сжигание	+	+	+	+
	Газификация и создание газогенераторов	–	+	+	+
	Гидролиз и дистилляция	–	–	+	+
	Пиролиз	–	–	–	+
	Влажная биомасса				
	Брикетирование прессованием коры, щепы и отходов древесины	+	+	+	+
	Анаэробное сбраживание	–	+	+	+
	Сбраживание и дистилляция	–	–	+	+
	III. Органические отходы				
	Сжигание городского мусора	+	+	+	+
	Анаэробное сбраживание органических отходов	+	+	+	+
	Глубинное тепло Земли				
	ГеоТЭС				
	Парогидротермальные ГеоТЭС	+	+	+	+
	Комбинированные ТЭС с ПЦС	+	+	+	+
	Комбинированные солнечно–геотермальные ТЭС с ПЦС		–	–	+
	ГеоТЭС с ПЦС	–	–	+	+

1	2	3	4	5	6
	Петрогеотермальные ТЭС	–	–	+	+
	ГеоТЭС с низкокипящими рабочими телами	–	–	–	+
	Ветроэнергетика				
	Ветроагрегаты для энергоснабжения автономных потребителей				
	Малые ветроагрегаты с горизонтальной осью	+	+	+	+
	Малые ветроагрегаты с вертикальной осью	+	+	+	+
	I. Крупные ветроагрегаты для ВЭС				
	С горизонтальной осью	–	–	–	+
	С вертикальной осью и вертикальными лопастями	–	–	+	+
	Гидравлическая энергия рек				
	Традиционные крупные ГЭС	+	+	+	+
	ГАЭС	+	+	+	+
	Энергия Мирового океана				
	Термоградиентные ОТЭС	–	–	–	+
	Арктические термоградиентные ТЭС	–	–	+	+
	ПЭС				
	В том числе ПЭС, работающие совместно с потребителем	–	+	+	+
	Использование океанических течений	–	–	–	+
	Волновые энергетические установки	–	+	+	+
	Использование энергии прибоя	–	–	+	+
	Использование градиентов солености	–	–	–	+

АВЭУ – автономная ветроэнергетическая установка;
ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция;
ОТЭС – океаническая термоградиентная электростанция;
ГеоТЭС – геотермическая электростанция;
СТЭС – солнечно-топливная электростанция;
ФЭП – фотоэлектрический преобразователь;
ФЭС – фотоэлектрическая станция;
ФЭУ – фотоэлектрическая установка.

ГЛАВА 3. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

3.1. Мировое потребление энергоресурсов

Потребление энергии во всем мире непрерывно растет, что объясняется ростом населения, происходящим процессом индустриализации, вызывающим повышение расхода материалов на душу населения, увеличение энергозатрат на работу транспорта и добычу природных ископаемых, на повышение плодородия почв и пр.

Одновременно в мире растет обеспокоенность социальными и экологическими последствиями наращивания мощностей тепловых электростанций, работающих на органическом топливе, и атомных электростанций. Атомная энергетика сегодня уже не считается, как ранее, дешевой, чистой и надежной альтернативой традиционным нефтяным и угольным ТЭС. Лишь немногие страны (Япония, Франция) продолжают наращивать потенциал АЭС. При эксплуатации АЭС не полностью решены вопросы захоронения радиоактивных отходов, всевозрастающего количества отслужившего загрязненного оборудования, и, главное, не исключена опасность возникновения крупных аварий с непредсказуемыми последствиями.

Доказано, что более половины объема энергии, получаемой при сжигании топлива, теряется в процессах преобразования и потребления. В связи с этим поставлен вопрос о совершенствовании эффективности потребления энергоресурсов, и в первую очередь электроэнергии.

Второй вопрос – дальнейшее развитие техники и технологии возобновляемых источников энергии.

В общем случае к возобновляемым источникам энергии относятся практически неисчерпаемые источники,

способные восстанавливать свой энергетический потенциал, в т. ч. некоторые традиционные источники энергии, например, водные потоки и геотермальное тепло.

Мировое потребление первичных энергоресурсов к 2010 г. придет на уровень 15 млрд. т у. т, а структура энергопотребления будет иметь следующий вид:

Попутный газ, нефть	Уголь	АЭС	Возобновляемые источники энергии
50%	25%	15 %	10%

По прогнозам ученых, возобновляемые источники энергии составили и составят в мировом энергопотреблении, млн. т у. т:

1980 г.	2000 г.	2020 г.
10 (0,1 %)	до 500 (1,4-1.9%)	1150-1450 (5,6-5,8%)

Энергия солнечного излучения, падающего на поверхность Земли, в 20 тыс. раз превосходит современное потребление энергии. Энергия ветра составляет 1,7-1,8% солнечной энергии. До высоты 150 м количество ветровой энергии составляет $4,2\text{-}4,5*10^{18}$ Дж или примерно $1,2*10^{12}$ кВт-ч. Поэтому теоретически можно за счет ветровой энергии покрывать 5-10% общего потребления электроэнергии.

Ныне источники возобновляемой энергии покрывают до 10% европейского энергопотребления, а в 2010 г. ожидается его повышение до 25%.

Таким образом, можно сказать, что освоение альтернативных источников энергии наблюдается в тех странах, где ограничены запасы органического топлива и не развивается ядерная энергетика.

Хозяйственное использование солнечной, ветровой и других возобновляемых видов энергии определяется уровнем развития инженерно-технических средств улавливания, преобразования и аккумулирования энергии, надежностью и сроками службы установки, их стоимостью.

Так, солнечная энергия широко используется для обогрева и охлаждения зданий, горячего водоснабжения,

сушки плодов и другой сельскохозяйственной продукции. Основным элементом установок для подобного использования солнечной энергии являются различной конструкции коллекторы солнечной энергии, которые могут быть изготовлены из различных материалов, вплоть до полимеров.

В настоящее время в США разработаны проекты животноводческих ферм, теплиц, установок для сушки сельскохозяйственной продукции, где широкое применение нашли установки преобразования солнечной энергии в тепловую. Опыт их эксплуатации показывает, что в этом случае возможно снижение на 30-50% расхода топлива.

Системы для преобразования солнечной энергии в большинстве случаев работают с аккумуляторами тепловой энергии и установками, использующими другие источники энергии, т.е. комбинированные (например, энергия ветра и биомассы).

В США в настоящее время более 1 млн. жилых домов оборудовано солнечными водонагревателями.

Наиболее подходящими источниками для децентрализованного тепло- и электроснабжения отдельных сельских районов, по прогнозам индийских ученых, в будущем будут ГЭС, солнечные и ветровые установки, использование энергии биомассы. Все это должно привести к 20% экономии традиционных видов топлива. Для широкого развития и использования возобновляемой энергетики необходимо существенное снижение стоимости и повышение КПД в отношении солнечных электростанций и крупных ветроэнергетических установок.

С учетом социальных и экологических факторов, стоимость электроэнергии ТЭС и АЭС увеличивается. Наблюдается тенденция увеличения стоимости электроэнергии от традиционных источников энергии и уменьшения от возобновляемых источников энергии.

Для широкого использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии необходима помощь государства. Во многих промышленно развитых странах

созданы специальные комиссии, занимающиеся этим вопросом, разработаны и выполняются национальные программы.

Во многих странах обратились к возобновляемым источникам энергии в связи с повышением внимания к экологической обстановке. Так, например, специальные исследования, проведенные при поддержке министерства энергетики США, показали, что гелиоэнергетические установки приводят к значительному сокращению количества отходов и загрязняющих выбросов в атмосферу и при этом занимают меньшую площадь по сравнению с традиционными энергосистемами.

Расширение использования возобновляемых источников энергии и внедрение энергосберегающих технологий позволят уменьшить опасность «кислотных дождей» и снизить содержание двуокиси углерода в атмосфере. Высвобождающиеся при этом нефтепродукты целесообразно использовать по другому назначению.

Выработка электроэнергии при помощи ядерной энергетики и возобновляемых источников энергии, таких как ветровая и гидроэнергия, а также энергия солнца, использование биомассы, не ведет к выбросам двуокиси углерода. Значительное увеличение выбросов двуокиси углерода приводит к так называемому парниковому эффекту.

Для того чтобы среднее значение температуры на Земле не повысилась более чем на 1-2 °С (что должно предотвратить возникновение парникового эффекта), эмиссия двуокиси углерода в мировом масштабе должна быть снижена к 2050 г. на 60%.

Но, несмотря на все преимущества нетрадиционных возобновляемых источников энергии, как наиболее чистых технологий, им все же присущи некоторые недостатки.

Нетрадиционные источники энергии оказывают следующее влияние на окружающую среду:

– биомасса – использование почвы при создании энергетических плантаций, загрязнение воздуха при сжигании биомассы, загрязнение воды при переработке;

Таблица 3.1

Сопоставительные эколого-экономические показатели энергетического производства

Показатель	Угольная ГЭС	Газо-мазутная ГЭС	ГЭС	АЭС	Нетрадиционные источники энергии			
					Солнечная	Ветровая	Геотер-мальная	Биомас-са
1. Объем вредных выбросов в атмосферу, кг/(МВт.ч)	20...25	2...15	-	-	-		Менее 1	3...10
2. Потребление свежей воды, $м^3$/(МВт.ч)	40 ... 60	25 ... 35	-	70.. 90	-	-	-	20
3. Сброс загрязненных сточных вод, $м^3$/(МВт.ч)	0,5	0,2	-	До 0,5	0,02	0,01	0,1	0,2
4. Объем твердых отходов, кг/(МВт.ч)	200 ... 300	0,2	-	0,2	-	-	-	0,2
5. Изъятие земель, га/(МВт.ч)	1,5	0,5 ... 0,8	100	2,0	2 ... 3	1 ... 10	0,2	0,2 ... 0,3
6. Количество сбрасываемой с охлаждающей водой теплоты, ГДж/(кВт.Ч)	7500	4500	-	7300	-	-	-	1500
7.Стоимость энергии, дол./(кВт.ч)	0,02... 0,04	0,025	-	0,1	,0 ... 2,0	0,05 ... 0,1	-	0,01
8. Удельные капитальные вложения, дол./кВт	1000 ... 1500	1000 ... 1500	1500	2000	10000 ... 800	1500	2000	-

– ветроустановки – перегрузка территории технологическими установками, проблема безопасности ветроустановок, изменение ландшафта, шум, изменение ветровой обстановки и т.д.;

– солнечные установки – изменение гидрометеорологической ситуации, отчуждение территории для крупных установок.

В настоящее время вредное воздействие от нетрадиционных источников энергии незначительно ввиду малого их распространения и размеров. По мере более широкого их использования этот эффект может увеличиться.

Области преимущественного использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на территории СНГ в ближайшие 10-15 лет составят быт, сельское хозяйство и кооперация, другие рассредоточенные небольшие объекты, удаленные от источников централизованного энергоснабжения.

В странах СНГ насчитывается более 90 млн. га мелкоструктурных, холмистых, горных и других неудобных сельскохозяйственных угодий, где невозможно или неэкономично использовать традиционную энергетику и где целесообразно применение НВИЭ. Также потребителями НВИЭ могут выступать подсобные участки, садово-огородные кооперативы и т. д. Крупным потребителем НВИЭ является пастбищное животноводство, так как в СНГ имеется свыше 300 млн. га естественных пастбищ.

Перспективность широкого применения солнечной и ветровой энергии в сельском хозяйстве обусловлена территориальной рассредоточенностью сельскохозяйственных потребителей, относительно небольшой требуемой мощностью многих типов технологического оборудования, большим количеством сельскохозяйственных объектов с автономным энергоснабжением.

В странах СНГ, по оценкам специалистов, потенциальные годовые запасы нетрадиционных возобновляемых источников энергии составляют более 60 млрд. т у. т, что во много раз превышает запасы органического топлива.

3.2. Опыт использования гелиоустановок за рубежом

В ряде стран солнечные водонагревательные установки стали обычным атрибутом жизни. Так, например, в Израиле горячее водоснабжение 80% всех жилых домов обеспечивается солнечными водонагревателями, что дает экономию более 5% производимой в стране электроэнергии. Многие десятки фирм-производителей различных типов солнечных коллекторов и водонагревательных установок успешно действуют в Европе, Америке, Австралии и других регионах мира. Суммарная площадь установленных в наше время солнечных коллекторов в мире превышает уже 50 млн. квадратных метров, что эквивалентно замещению традиционных источников энергии в объеме, равном примерно 5-7 млн. тонн условного топлива в год.

Пик развития «солнечного» рынка в мире, обусловленный разразившимся энергетическим «кризисом» и резким ростом цен на энергоресурсы, приходится на середину и конец 70-х годов XX в. Во многих странах были приняты специальные государственные программы прямой финансовой, законодательной и информационной поддержки и стимулирования развития технологий использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Говоря о солнечных водонагревателях, можно утверждать, что в настоящее время во многих странах мира технологии эффективного нагрева воды для бытовых целей солнечным излучением достаточно хорошо отработаны и широко доступны на рынке. Наиболее экономически эффективные сферы применения солнечных водонагревателей в значительной мере уже освоены. Например, в США более 60% частных и общественных плавательных бассейнов обогреваются за счет солнечной энергии (простейшие бесстекольные, без тепловой изоляции, как правило, пластиковые солнечные коллекторы).

Сегодня в России, в связи с климатическими условиями, число действующих солнечных установок весьма

ограничено. Тем не менее за последние годы в России сформировалось около десятка потенциальных производителей солнечных коллекторов и водонагревателей с отработанными на выпуске опытных и мелких партий технологиями их массового производства. Как правило, сегодня это – акционерные компании, занимающиеся другими основными видами деятельности.

Следует отметить, что, как правило, разработанные российскими производителями солнечные коллекторы, отвечают современным техническим требованиям. Они изготавливаются из нержавеющей стали, в ряде случаев имеют селективные покрытия панелей, современную теплоизоляцию. К сожалению, крупных заказов производители не имеют и выпускают установки от случая к случаю, в связи с чем цена на них устанавливается довольно высокой – в большинстве случаев от 100 до 300 долларов в расчете на 1 кв. м площади коллектора. Высокая цена на изделия в сочетании с относительно низкими, по сравнению с зарубежными, внутренними ценами на топливо резко ограничивает спрос. Ситуация усугубляется также слабой информированностью потенциальных потребителей о возможностях практического использования солнечных установок, их преимуществах. В отличие от ведущих зарубежных стран, отсутствует законодательство, устанавливающее какие-либо льготы для производителей и потребителей экологически чистых энергетических установок. Вместе с тем в связи с тенденцией неуклонного роста цен на топливо и электроэнергию интерес к солнечным водонагревательным установкам растет.

В таблице 3.2 приведены теплотехнические характеристики следующих коллекторов: простейший одностекольный солнечный коллектор с неселективным «черным» покрытием, двухстекольный солнечный коллектор с таким же покрытием теплопоглощающей панели и одностекольный коллектор с селективным покрытием. Указанные характеристики реально достижимы в производстве.

Таблица 3.2

Теплотехнические характеристики коллекторов

Тип солнечного коллектора	Суммарный приведенный коэффициент тепловых потерь в расчете на 1 кв. м поверхности (F_RU_L), Вт/м^2. К	Приведенный оптический КПД. ($F_R\alpha\tau$)	Отношение поглощательной способности панели к ее излучательной способности. (α/ε)
Одностекольный неселективный	7,0	0,8	0,98/0,95
Двухстекольный неселективный	4,0	0,7	0,98/0,95
Одностекольный селективный	4,0	0,78	0,95/0,12

Краснодарский край – типичный южный регион России, в котором в значительных объемах используются нетрадиционные возобновляемые источники: эксплуатируется 36 гелиоустановок горячего водоснабжения общей площадью 2700 м^2; ежегодно из 55 геотермальных скважин – 12 млн. м^3 с температурой 70-90 °С; установлено 36 ветродвигателей общей мощностью 130 кВт.

Анализ распределения интенсивности суммарной солнечной радиации по месяцам показал существенное превышение летних значений над зимними. Так, для Краснодара эти значения составляют: в июле – 670 МДж/м^2, в декабре – 80 МДж/м^2. Очевидно, что применение гелиоустановок для отопления неэффективно, а практическое значение имеет использование солнечной энергии для горячего водоснабжения в период с апреля по октябрь. Кроме того, анализ возможностей применения гелиоустановок свидетельствует, что при использовании солнечной энергии можно реализовать энергетические потребности 25% населения Краснодарского края, не имеющего централизованного теплоснабжения (916 тыс. человек), и 50% отдыхающих (5000 тыс. человек), при этом общая потребность края в гелиоустановках составляет 1450 тыс.м^2.

По состоянию на 1 ноября 1999 г. в Краснодарском крае фактически смонтировано и эксплуатируется 36 гелиоустановок теплопроизводительностью от 1 до 20 м^3 горячей воды в день. Эксплуатируемые гелиоустановки имеют солнечные коллекторы различных конструкций:

- 11 гелиоустановок оборудованы 2900 коллекторами Тбилисского и Братского заводов;
- 25 гелиоустановок оборудованы коллекторами Ковровского завода.

Около 95% гелиоустановок выполнено по одноконтурной схеме. Расчетная дневная производительность по горячей воде составляет от 1 до 12 м^3. При производительности до 3 м^3 в сутки гелиоустановки работают с термосифонной циркуляцией, при большей производительности – с насосной. Солнечные коллекторы, как правило, размещаются на кровлях зданий.

В России солнечные коллекторы серийно выпускаются Ковровским механическим заводом и предприятием «Конкурент» г. Жуковский Московской области. Отдельные партии коллекторов изготавливает НПО машиностроения в г. Реутове Московской области.

Ковровским заводом выпущено около 1500 солнечных коллекторов. Для данного завода характерно оптимальное для российского рынка соотношение «цена – качество». Во всех модификациях коллектора теплопоглощающая панель выполнена из латунной трубки, что обеспечивает коррозионную стойкость, и различных конструкций плавников (алюминиевые литые, стальные с обжимом и сварные). Покрытие теплопоглощающей панели – селективная эмаль. Стекло – оконное 4 мм, корпус – стальной. Теплоизоляция – пенополиуретан, воздушные полости из пергамина. Тыльная сторона теплоизоляции – алюминиевый или стальной лист, пергамин на ДВП. Соединение коллекторов – четырьмя патрубками с резинотканевыми муфтами. Площадь коллектора – 0,8-1,07 м^2. Масса сухая – 24-26 кг/ м^2, с водой – 27-30 кг/м^2. Рабочее давление – 6 кгс/см^2. Стоимость – 70 дол. США/м^2.

Таблица 3.3

N	Адрес, владелец	Общая площадь установки, м²	Количество коллекторов, шт.	Изготовитель коллекторов	Дата ввода в эксплуатацию	Количество и емкость баков, м³	Размещение коллекторов	Примечание
1.	«Кубаньтеплокоммунэнерго», ул.Селезнева	48	60	Ковров	1995	3	Навес	Душевые
2.	Торговый дом «Травы Кубани» ул.Новороссийская	8	10	Ковров	1994	1,5	Навес	Душевые
3.	Завод монтажных заготовок ул.Монтажников	8	10	Ковров	1994	1	Навес	Душевые
4.	Агропромснаб-1 ул.Уральская	24	30	Ковров	1995	3	Навес	Электрокотел на 2 кВт, душевые
5.	Краевая больница ул.Российская	86,4	108	Ковров	1995	10	Навес	Пищеприготовление, мытье посуды
6.	АО «КРАВТ» ул.Уральская	51,2	64	Ковров	1995	6	Кровля	Душевые, столовая
1.	ст.Благовещенская база отдыха «Ладога»							алюминий
	- гелиоустановка N1	2,4	3	Ковров	1999	0,2	Кронштейн.	плавник
	- гелиоустановка N2	19,2	24	Ковров	1999	2,0	Навес	
	- гелиоустановка N3	38,4	48	Ковров	1999	4,0	Кровля	столовая
	- гелиоустановка N4	38,4	48	Ковров	1999	4,0	Навес	душевые

N	Адрес, владелец	Общая площадь установки, м²	Количество коллекторов, шт.	Изготовитель коллекторов	Дата ввода в эксплуатацию	Количество и емкость баков, м³	Размещение коллекторов	Примечание
	ЕЙСК							
1.	Б/о Военторга	16	20	Ковров	1995	2	Кровля	
2.	Б/о Пермьтрансгаз	16	20	Ковров	1995	2	Навес	
1.	Б/о «Примула»	64	80	Ковров	1994	7	Навес	Душевые, столовые
2.	Б/о СКЖД	80	100	Ковров	1995	10	Кровля	Душевые, столовые
1.	Б/о «Нептун»	32	40	Ковров	1995	2x3	Кровля	Душевые, 2 эл.кот.л. ЭПЗ-25 столовая
	НОВОРОССИЙСК							
1.	БОФ, ул.Волочаевская	64	80	Ковров	1994	8	Кровля	
2.	Нефтеперевалочная база «Шесхарис»	72	90	Ковров			Навес	Душевые
3.	Пансионат «Зеленая роща»	26	32	Ковров			Кровля	Душевые
4.	Пансионат «Лесная поляна»	60	68	Ковров	2 кв. 1999 г.	6	Кровля	Столовая
	Ст. СМОЛЕНСКАЯ							
1.	База отдыха «Энергонадзора»	8	10	Ковров	1995	1	Кровля	Душевые

N	Адрес, владелец	Общая площадь установки, $м^2$	Количество коллекторов, шт.	Изготовитель коллекторов	Дата ввода в эксплуатацию	Количество и емкость баков, $м^3$	Размещение коллекторов	Примечание
			СОЧИ					
1.	Пансионат «Подмосковье»	48	60	Ковров	1995	4	Навес	Душевые
2.	Пансионат «МАГРМ»	8	10	Ковров	1995	1	Навес	Столовая
3.	Санаторий им.М.В.Фрунзе	72	92	Ковров	1996	2x5	Кровля	ЦТП
			ТЕЙДРЮК					
1.	Тепловые сети, котельная д/с «КОЛОКОЛЬЧИК»	16	20	Ковров	1999	2,0	Кровля	Стал. плавник
			ТУАПСЕ					
1.	Нефтебаза «Заречье»	8	10	Ковров	1998	1	Кровля	Душевая

На основе данных коллекторов Ковровским заводом изготавливается солнечная водонагревательная установка для индивидуальных потребителей с двумя коллекторами, теплоизолированным баком-аккумулятором, опорными конструкциями, соединенными патрубками.

Солнечные коллекторы фирмы «Конкурент» имеют технические характеристики на уровне лучших зарубежных образцов. Теплопоглощающая панель выполнена штампованной из нержавеющей стали, толщиной 0,3-0,5 мм. Селективное покрытие выполнено напылением в вакуумной камере. Теплоизоляция комбинированная: базальтовое волокно в алюминиевой фольге, пенополиуретан.

Стекло упрочненное, с низким содержанием железа, толщиной 3 мм. Корпус и тыльная сторона коллектора выполнены из алюминиевых сплавов. Соединение коллекторов четырьмя резинотканевымм патрубками. Площадь коллектора – 1 м^2. Масса сухая – 23,5 кг, с водой – 24,75 кг. Рабочее давление – 6 кгс/ см^2. Стоимость – 220 дол. США/м^2. Коллектор данной фирмы имеет малое сечение каналов теплопоглощающей панели и рассчитан для работы на антифризе.

Фирма «Конкурент» выпускает также солнечные водонагревательные установки для индивидуальных потребителей «Радуга-2М». В комплект установки входит два коллектора площадью 2 м^2, теплоизолированный бак-аккумулятор с емкостью на 200 литров. В контуре солнечных коллекторов – антифриз, в баке – пластинчатый теплообменник, регулятор подпитки, электронагреватель мощностью 16 кВт. В комплект установки входят соединительные шланги, опорные конструкции. Стоимость данной гелиоустановки – 1000 дол. США.

Солнечные коллекторы НПО машиностроения (г. Реутов) имеют штампованную теплопоглощающую панель из нержавеющей стали, толщиной 0,8 мм. Селективное покрытие выполнено напылением в вакуумной камере. Стекло упрочненное, с низким содержанием железа. Корпус и тыльная сторона – из нержавеющей стали. Площадь

коллектора – 0,9; 1,2 м^2. Масса сухая – 27,34 кг. Рабочее давление – 4 кгс/см^2. Стоимость – 230 дол. США/м^2.

На основе данных коллекторов НПО машиностроения предлагает две модели солнечных водонагревательных установок емкостью 80 литров (один коллектор), 120 литров (два коллектора). Установки – одноконтурные. Стоимость установки – 900 долл. США.

На Украине солнечные коллекторы изготавливают предприятие «Южстальконструкция» (г. Симферополь), фирма «СолАрИнж» (г. Киев), Крымский электротехнический завод (г. Севастополь).

Симферопольский завод выпускает солнечные коллекторы с теплопоглощающей панелью из алюминиевого плавникового профиля площадью 1,5 м^2. Стекло – оконное. Корпус из алюминиевого профиля. Теплоизоляция – пенополиуретан. Стоимость – 100 долл. США/ м^2.

Севастопольский завод отдельными партиями изготавливает коллекторы с теплопоглощающей панелью из стальных труб, приваренных к стальному листу. Стекло – оконное. Корпус – стальной. Площадь коллектора – 1,03 м^2. Стоимость – 100 дол. США/м^2.

Киевская фирма предлагает две модели солнечных коллекторов. Модель КС-3 имеет листотрубную стальную теплопоглощающую панель. Площадь – 1,5 м^2. Масса сухая – 41 кг, с водой – 59 кг. Стоимость – 50 дол. США/м^2. Модель КСБ-400 имеет теплопоглощающую панель из латунных трубок с алюминиевым оребрением. Площадь – 1,4 м^2. Масса сухая – 28 кг, с водой – 36 кг. Стоимость – 125 дол. США/м^2.

В табл. 3.4 приведены технические характеристики и стоимость солнечных коллекторов, выпускаемых предприятиями Украины.

Из зарубежных конструкций оптимальное соотношение «качество – стоимость» имеют израильские коллекторы, которые можно разделить на три вида:

- наиболее качественные, стоимостью свыше 150 дол. США/м^2;

Таблица 3.4

Технические характеристики и стоимость солнечных коллекторов, выпускаемых предприятиями Украины

Шифр, материал поглотителя разработчик-изготовитель	Габариты, площадь, м/м²	Приведенный		Общая масса, м²/кг	Ориентир. стоим., дол. США/м²
		Оптич. кпд	Коэфф. потерь Вт/м², К		
1. КСБ-4 латунно-алюминиевый МП «СолАрИнж», з-д «[illegible]» (г. Киев)	1,6x1,0x0,08 1,6	0,73	5,3	40/25	130
2. КС-3-1 стальной листотрубный остекленный	1,56x1,01x0,09 1,45	0,75	5,8	59/40	65
3. КС-3-2 стальной листотрубный неостекленный ПИНЗИ АСУ и организации корпорации «Укрмонтаж спецстрой»	1,56x3,00x0,04 4,78	0,92	34,0	100/21	40
4. ВСВ 100/100-1 Бытовой солнечный водонагреватель «Укргелиопр[illegible]» (г. Киев)	1,60x0,75x0,50 1,00	н.д.	н.д.	*/ 80/80	100
5. Из алюминиевых сплавов НПФ «Новые технологии» (г. Одесса)	1,20x0,90x0,10 1,10	н.д.	н.д.	н.д.	110
6. Из алюминиевых сплавов «Спецгелиомонтаж» (г. С[illegible]ополь)	1,60x1,00x0,10 1,60	н.д.	н.д.	37/23	105

**/ Включая 2 бака-аккумулятора, обвязку и арматуру*

- средние по качеству, стоимостью до 150 долл. США/м²;
- стандартного качества, стоимостью до 100 долл. США/м².

Наиболее качественные коллекторы имеют теплопоглощающую панель из медных труб и медного листа, способ соединения панели и труб – сварка. Покрытие – селективное. Стекло – градостойкое, содержание железа – 0,03%, толщина – 3,2 мм. Каркас из оцинкованной стали, с покрытием порошковым полиэстером или из анодированного алюминия. Теплоизоляция – пенополиуретан, стекловата.

Средние по качеству коллекторы имеют теплопоглощающую панель из медных труб и стального листа. Способ соединения – обжим. Покрытие – селективное. Стекло – градостойкое с низким содержанием железа, толщиной 3,2 мм. Корпус из оцинкованной стали. Теплоизоляция – пенополиуретан.

Стандартные по качеству коллекторы имеют теплопоглощающую панель из оцинкованных стальных труб и листа. Способ соединения – обжим. Покрытие – селективная эмаль. Стекло – оконное, толщиной 3 мм. Корпус из оцинкованной стали. Теплоизоляция – пенополиуретан.

Основной причиной, сдерживающей массовое сооружение гелиоустановок, является высокая удельная стоимость – 1500-3000 дол. США/м^3 в сутки, а следовательно, большие сроки окупаемости.

Основным направлением сокращения срока окупаемости гелиоустановок является удешевление солнечных коллекторов.

На рис. 3.1 представлена сезонная термосифонная установка СВУ-125 ТС, которая представляет собой комплекс, состоящий из солнечного коллектора «ГелиКон», водонагревателя косвенного нагрева, емкостью 125 литров, металлического каркаса, трубной обвязки и группы безопасности. Установка СВУ-125 ТС способна нагреть до 240 литров воды до температуры 65 $^{\circ}$C при благоприятных погодных условиях.

Стационарные установки с принудительной циркуляцией круглогодичного действия эффективны для решения задач по горячему водоснабжению жилых домов, пансионатов, гостиниц, административно-бытовых корпусов промышленных предприятий и др.

Исходя из норм потребления горячей воды, для каждого конкретного случая определяется количество солнечных коллекторов, составляющих в данной системе единое коллекторное поле. А также рассчитываются:



Рисунок 3.1. *Сезонная термосифонная установка СВУ-125 ТС*

• необходимое количество емкостных баков-аккумуляторов и определяется их тип;

• требуемая каркасная система для монтажа конструкции;

• группа безопасности;

• автоматика и схема трубной обвязки всей гелиосистемы.

Солнечные установки круглогодичного действия работают с отдельным первичным контуром, который заполняется рабочим агентом на базе антифриза. Их характеристики:

• стоимость одного коллектора – свыше 300 дол. США;

• стоимость автоматики, трубной обвязки, несущих конструкций и др. является индивидуальной и зависит от принятых проектных решений.

Срок окупаемости таких гелиоустановок ориентировочно составляет 1,5-3,5 года.

В последнее время во всем мире большое внимание уделяется охране окружающей среды. В декабре 1997 г. Россия подписала Киотский протокол и взяла на себя обязательства по сокращению выбросов CO_2 и других парниковых газов.

Основную долю электрической и тепловой энергии в России, да и во всем мире, производят угольные ТЭС, дающие наибольшее количество вредных выбросов (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Вредные выбросы при производстве энергии на угольных ТЭС

Вид вырабатываемой энергии	Вредные выбросы					
	SO_2, т	NO_x, т	CO_2, т	Зола, шлак, т	Тепловые загрязнения, МДж	Потребление кислорода, т
1.Электрическая энергия (на 1000 МВт.ч	31,8	3,0	870,0	73,0	$(6 \ldots 8)*10^6$	633,0
2.Тепловая энергия (на1000 Гкал)	18,0	1,7	492		$(3 \ldots 4)*10^6$	358,0

С другой стороны, по данным Мирового энергетического совета (МИРЭС), запасов нефти, угля и газа при нынешнем уровне потребления хватит соответственно на 40, 250 и 60 лет. Недостаточные электрификация и механизация личных подсобных хозяйств (процессов кормоприготовления, обработки участков, отопления жилых и производственных помещений, подогрева воды, приготовления пищи и т.п.) обусловливают большие затраты труда сельской семьи на эти нужды. Такие затраты в 2,5 раза превышают затраты труда в общественном секторе сельскохозяйственного производства. В среднем затраты труда одной семьи на ведение личного подсобного хозяйства составляют 5,4 ч. Затраты времени только на обслуживание источников теплоты на газе и жидком топливе составляют 0,1-0,3 ч, твердом топливе – 1,5-2 ч.

Перечисленные причины, а также тенденция к повышению стоимости органического топлива и тарифов на электрическую и тепловую энергию приводят к более широкому использованию возобновляемых источников энергии. Использование солнечной энергии для горячего водоснабжения в Европе выросло с начала 80-х годов XX в. на 18%. Сейчас площадь остекленных коллекто-

ров для нагрева воды составляет 23 млн. м^2, а неостекленных для подогрева воды в бассейнах – 5 млн. м^2. Стоимость самых простых солнечных установок горячего водоснабжения (термосифонных) во Франции составляет 8-10 тыс. франков, тогда как электроустановок той же тепловой мощности – 4-5 тыс. франков. Средняя стоимость солнечных металлических плоских коллекторов для получения тепловой энергии составляет 350-1000 дол./м^2 (включая затраты на монтаж). Ожидается, что к 2020 г. их стоимость снизится до 50-400 дол./м^2.

Американской компанией «Heliodyne, Inc.» выпускается ряд коллекторов «Gobi» площадью 2,24, 3,00 и 3,74 м^2 при стоимости 388, 519 и 647 дол. США соответственно (данные 1998 г.). Удельная стоимость собственно коллекторов около – 200 дол./м^2. Этой же компанией выпускаются и солнечные водонагревательные установки одноконтурные (летний вариант) и двухконтурные, которые могут работать круглый год. В комплект установки входят 1 коллектор «Gobi-308» площадью 3 м^2, бак-аккумулятор емкостью 240 л, насос, система контроля и управления. Стоимость одноконтурной установки – 1096 дол., двухконтурной – 1689 дол. Удельная стоимость – 365,3 дол./м^2 и 563 дол./м^2 соответственно*. Кроме небольших установок, обеспечивающих потребности в горячей воде отдельных коттеджей, в США разработан и смонтирован ряд крупных установок (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Солнечные водонагревательные установки большой тепловой мощности

Месторасположение	Год запуска	Общее теплопотребление здания, Гкал/ (МДж)	Теплопроизводительность солнечной установки, Гкал/ (МДж)	Площадь солнечной установки, м^2	Стоимость (с учетом монтажа), дол. США
State Transportastion Building (Boston MA)	1982	205/($862*10^4$)	171/($0,7*10^6$)	371,6	250000

* *Стоимости по данным 2000 г.*

Месторасположение	Год запуска	Общее теплопотребление здания, Гкал/ (МДж)	Теплопроизводительность солнечной установки, Гкал/ (МДж)	Площадь солнечной установки, $м^2$	Стоимость (с учетом монтажа), дол. США
University, California, Los Angeles	1984	3273/(13,7*10^6)	1964/(8,2*10^6)	2267	940800
Saint Rose Hospital, Texas	1990	378/(13,7*10^6)	302/(1,27*10^6)	465	145000
The Greenview Condominium Honolulu, Hawaii	1994	322/(1,35*10^6)	209/(0,876*10^6)	223	156000

Солнечный коллектор «Стандарт-А» из сотовых полимеров предназначен для аккумулирования тепловой солнечной энергии теплоносителем – водой или антифризом при температуре наружной поверхности панели от – 35 до +90 °С, температуре теплоносителя до + 90 °С.

Эти коллекторы рекомендуются для:

- установки на крышах малоэтажных жилых домов, небольших предприятий, у парников и теплиц – для отопления помещений;
- для производственных помещений (кафе, рестораны, предприятия службы быта, небольшие гостиницы, авторемонтные мастерские) – для потребления воды;
- в открытых и закрытых бассейнах любого объема для подогрева воды;
- установки на летних душевых кабинах.

Солнечный коллектор «Стандарт-А» представляет из себя сварной неразборный пакет-аккумулятор в прочной алюминиевой раме, теплоноситель в котором поглощает солнечную энергию и передает ее воде.

Материал коллектора имеет весьма высокий коэффициент поглощения солнечной энергии и малый коэффициент обратного излучения (5%). Специальная добавка, входящая в химический состав основного материала, предохраняет коллектор от разрушения под воздействием ультрафиолетовых лучей. В среднем в зависимости от интенсивности солнечной радиации, климатических ус-

ловий местности 1 коллектор нагревает 10-20 литров воды в час до 50-70 °С.

Холодная вода подается в нижнюю трубу коллектора, заполняет его, нагревается от солнечных лучей и выводится в аккумулирующий бак. Процесс естественного устремления нагреваемой воды вверх называется термосифонным эффектом.

В таблице 3.7. приведены технические характеристики солнечного коллектора «Стандарт-А».

Таблица 3.7

Технические характеристики солнечного коллектора «Стандарт-А»

Длина	мм	970
Ширина	мм	1030
Толщина	мм	35
Общая площадь коллетора	$м^2$	1,0
Площадь активного поля	$м^2$	1,0
Вес	кг	7,0
Рабочий объем	л	4,0
Максимальное давление	атм	2,0
Рабочее давление	атм	1,0
Максимальная температура воды	С	90
Максимальный КПД	%	82

Система стандартного круглогодичного тепловодоснабжения коттеджа состоит из следующих частей:

- блок солнечных коллекторов из расчета 10 коллекторов на 100 $м^2$ жилого помещения;
- аккумулирующий бак с теплоизоляцией на 100, 200, 500 литров или в комбинации, в зависимости от расчетов потребления тепла;
- 1 или 2 циркуляционных насоса для обеспечения работы системы;
- таймер для отключения верхнего контура системы в ночное время (верхний контур работает на антифризе);
- дополнительный бойлер для догрева воды при необходимости;
- радиаторы, трубы и водозапорная арматура.

Стандартная гелиосистема для летнего дачного дома состоит из следующих частей:

- блок солнечных коллекторов – 1-10 штук, в зависимости от потребления воды;
- аккумулирующий бак с теплоизоляцией на 50, 100, 200 литров или в комбинации;
- 1 циркуляционный насос верхнего контура или без насоса;
- трубы или шланги, водозапорная арматура.

Стандартная гелиосистема для малых производственных предприятий состоит из следующих частей:

- блок солнечных коллекторов из расчета 10 литров горячей воды в час на 1 коллектор;
- аккумулирующий бак с теплоизоляцией на 100, 200, 500 литров или в комбинации, в зависимости от расчетов потребления теплой воды;
- 1 циркуляционный насос;
- трубы или шланги, водозапорная арматура.

Гелиосистема для отопления открытых бассейнов состоит из следующих частей:

- блок солнечных коллекторов из расчета 10 литров горячей воды в час на 1 коллектор;
- циркуляционный насос;
- трубы или шланги, водозапорная арматура.

ГЛАВА 4. ОСНОВЫ МЕТЕОРОЛОГИИ

4.1. Основные задачи метеорологии

В последнее время во многих странах мира разрабатываются проекты использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, к которым, в первую очередь, относятся солнечная и ветровая энергия.

Проектирование солнечных электростанций и ветровых энергетических установок требует прогноза характеристик источников энергии, используемой данными типами электроустановок.

В этой связи оценка метеоусловий в районах строительства является основополагающей для определения их энергетической и экономической эффективности.

Метеорология – это наука об атмосфере, изучающая ее состав, свойства и протекающие в ней физические и химические процессы. Метеорологию кратко и емко называют физикой атмосферы. Метеорология составляет часть более общей науки – геофизики, которая изучает явления и процессы, происходящие в атмосфере, на поверхности суши и в толще почвогрунтов (рис. 4.1).



Рисунок 4.1. *Структурная схема науки – геофизики*

Основные задачи метеорологии:

· изучение всех физических и химических процессов и явлений, происходящих в атмосфере;

· изучение закономерностей, по которым эти процессы и явления происходят;

· прогнозирование наступления и развития атмосферных процессов и явлений;

· организация системы наблюдений за атмосферными явлениями и процессами;

· разработка методов управления процессами, происходящими в атмосфере;

· использование результатов метеорологической информации в отраслях народного хозяйства: прежде всего, в авиации, для морского, железнодорожного и автомобильного транспорта, при проектировании и строительстве различных ответственных сооружений (линий электропередачи, зданий, водохранилищ, газопроводов и электростанций).

В прямой и непосредственной зависимости от метеорологической информации находится сельскохозяйственное производство.

Решение проблем по экологии и охране окружающей среды также связано с метеорологическими наблюдениями за процессами загрязнения атмосферы и водных объектов.

Перечисленные основные задачи метеорологии базируются на решении следующих конкретных отдельных задач или подзадач:

· изучение основных характеристик атмосферы: состава, вертикального расслоения, горизонтальной неоднородности, атмосферного давления и др.;

· изучение солнечной, земной и атмосферной радиации: потоки солнечной энергии в атмосфере, спектр солнечной радиации, приход и расход солнечной энергии;

· тепловой режим почвы и водоемов: нагревание и охлаждение почвы, суточный и годовой ход температуры поверхности почвы, изменение температуры почвы с глубиной, температурный режим водоемов;

• тепловой режим атмосферы: нагревание и охлаждение воздуха, суточные и годовые колебания температуры, влияние растительного покрова, географическое распределение температуры приземного слоя атмосферы, изменение температуры по высоте, адиабатические процессы в атмосфере;

• водяной пар в атмосфере: испарение, влажность, конденсация водяного пара, образование различных видов и разновидностей облаков;

• образование атмосферных осадков: разновидность осадков и их характеристики, распределение осадков по земной поверхности;

• воздушные течения в атмосфере: изменение скорости и направления ветра, влияние препятствий на ветер, изменение скорости и направления ветра по высоте;

• оптические явления и электрические процессы в атмосфере: рассеяние и поглощение света, дальность видимости, преломление и отражение света в атмосфере, электрическое поле и электрическая проводимость атмосферы, грозовое электричество;

• звуковые явления в атмосфере: скорость звука, преломление и отражение звука, ослабление звука в атмосфере.

Рассмотрим важнейшие из перечисленных задач для изучения источников возобновляемой энергетики.

Поскольку метеорология решает очень большой круг задач, то она подразделяется на несколько отдельных направлений.

Синоптическая метеорология – направление метеорологии, которое изучает закономерности развития атмосферных процессов, определяющих условия погоды, и разрабатывает методы ее прогноза.

Погодой называется состояние атмосферы и совокупность наблюдаемых в ней в данный момент явлений.

Климатология – направление метеорологии, которое изучает условия и закономерности формирования климата, распределение по земному шару и изменение климата во времени.

Климатом данной местности называется режим погоды, характерный для этой местности в многолетнем разрезе и обусловленный солнечной радиацией, характером подстилающей поверхности (поверхность, на которую направлена солнечная радиация) и циркуляцией атмосферы.

Неоднородность подстилающей поверхности определяет различный климат. Изучением особенностей климата, связанных с неоднородностью подстилающей поверхности, занимается **микроклиматология**.

Актинометрия – направление метеорологии, которое изучает солнечное, земное и атмосферное излучение в условиях атмосферы.

Физика атмосферы – направление метеорологии, которое изучает физические закономерности процессов и явлений, происходящих в приземных, то есть нижних слоях, атмосферы, в свободной атмосфере (аэрология) и в верхних слоях атмосферы.

Иногда актинометрию относят к физике атмосферы. Физика атмосферы подразделяется на атмосферную оптику, атмосферное электричество и атмосферную акустику.

Динамическая метеорология – направление метеорологии, которое изучает динамику атмосферы (движение) и связанные с ней преобразования энергии на основе законов гидромеханики и термодинамики.

Одной из важных задач этого направления является разработка математических моделей атмосферных процессов для составления прогнозов погоды, исследования экологии окружающей среды, изменений климатических явлений.

Прикладная метеорология – направление метеорологии, которое изучает влияние различных метеорологических процессов на функционирование различных отраслей народного хозяйства.

Различают **сельскохозяйственную метеорологию** (агрометеорологию), **медицинскую метеорологию** (биометеорологию), **авиационную метеорологию** и др.

4.2. Организация системы наблюдений и контроля за состоянием природной среды

Основным методом исследования в метеорологии является **наблюдение**, или **мониторинг.**

Полученные результаты наблюдений обрабатываются и обобщаются с помощью методов математической статистики и теории вероятностей.

Государственная система наблюдений и контроля за состоянием природной среды (ГСКП) осуществляет весь комплекс работ по производству наблюдений, сбору, обработке информации, составлению прогнозов и передаче информации потребителю.

ГСКП состоит, таким образом, из четырех систем:

1) система получения информации (система наблюдений, мониторинга);

2) система сбора и распространения информации в другие подсистемы (система связи);

3) система обработки и обобщения информации (составления прогноза, предупреждений для чрезвычайных условий и др.);

4) система передачи информации потребителю.

Основной системой является система получения информации, которая состоит из двух подсистем: наземной и космической (спутниковой).

Наземная подсистема представляет собой разветвленную гидрометеорологическую сеть, которая базируется на трех видах источников информации: гидрометеорологические обсерватории, гидрометеорологические станции, гидрометеорологические посты.

Гидрометеорологические обсерватории – это научно-исследовательский комплекс, где, помимо общеметеорологических наблюдений, проводятся научно-исследовательские работы по специальным проблемам метеорологии.

Основными источниками информации служат *гидрометеостанции и посты.* Таким образом, *гидрометеорологическая сеть* представляет собой совокупность гидрометеостанций и постов, на которых проводятся система-

тические наблюдения за состоянием атмосферы и водных акваторий суши, включая моря, уровень загрязнения природной среды, то есть с учетом экологических аспектов окружающей среды.

Гидрометеорологическая сеть подразделяется на основную (или опорную) и специальную.

Основная сеть состоит из опорных гидрометеостанций и постов, служащих для систематического получения основной информации о состоянии окружающей среды с необходимой полнотой и точностью с учетом изменения во времени.

Специальные станции и посты организуются для обеспечения информацией отдельных отраслей, поэтому носят ведомственный характер, хотя входят в общую гидрометеосеть. Например, гидрометеостанции и посты имеются в системе таких ведомств или акционерных обществ, как министерства топлива и энергетики, путей сообщения, сельского хозяйства и др.

Все станции и посты подразделяются на метеорологические и гидрологические.

Метеорологические станции и посты являются по своему характеру материковыми, и на них ведутся в качестве основных метеорологические наблюдения, а в качестве второстепенных – частично гидрологические.

Гидрологические станции и посты расположены на водных акваториях, и на них ведутся в качестве основных гидрологические наблюдения, а в качестве второстепенных – частично метеорологические.

4.3. Принципы построения гидрометеорологической сети

Основные метеорологические элементы. Гидрометрическая сеть должна быть построена рационально. Это означает, что количество постов и станций и их место расположения должно быть такое, чтобы можно было вычислить для любого пункта данной территории значе-

ние каждого метеорологического элемента с необходимой точностью.

Точность определения каждого метеорологического элемента в данном пункте зависит от расстояния между ближайшими станциями и от изменчивости данного элемента по территории и во времени.

В горных районах изменчивость дополнительно зависит от высоты местности, характера рельефа, расположения склонов, что требует более плотной сети расположения станций и постов.

Основными метеорологическими элементами называется комплекс качественных и количественных характеристик, с помощью которых можно охарактеризовать состояние атмосферы и происходящие в ней процессы.

Основными метеорологическими элементами являются следующие показатели:

- солнечная радиация;
- температура воздуха и почвы;
- атмосферное давление;
- скорость и направление ветра;
- испарение и влажность воздуха;
- облачность;
- видимость;
- погодные явления или климатические процессы (осадки, атмосферные явления – метели, туманы, грозы и т. д.).

Все перечисленные метеоэлементы по степени изменчивости в пространстве можно разделить на две группы.

К первой группе относятся метеоэлементы, для определения которых с достаточной степенью точности допустимо расстояние между станциями в пределах 60-70 км. Это солнечная радиация, температура воздуха и почвы, ветер, испарение и влажность воздуха, облачность.

Ко второй группе относятся метеоэлементы, которые для их достаточно достоверного определения требуют выдерживать расстояние между станциями не более 25-30 км, а в горных районах – 10-15 км. Это метеоэлементы, связанные с погодными явлениями и видимостью (осадки, атмосферные явления: туманы, грозы, снежный покров и др.).

В течение суток для определения суточного хода изменения метеоэлементов установлены определенные сроки наблюдений и измерений – 8 раз для станций и 2 раза – для постов.

Оптимальным расстоянием между станциями с учетом особенностей гидрометеорологической сети и ее экономической эффективности являются для обжитых районов в среднем 60-70 км (одна станция на 3,5-5 тыс. км^2). В необжитых районах – 100-150 км.

Для определения оптимальных расстояний между конкретными станциями и постами наблюдений необходимо учитывать конкретные условия местности (ландшафт, рельеф и др.).

Если гидрометрическая сеть построена в соответствии с рассмотренными принципами, то среднеквадратические отклонения (или ошибки) не превысят величин, приведенных в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Среднеквадратичные отклонения

Метеоэлемент	Среднеквадратическая погрешность	
	За срок наблюдений	Средняя за сутки
1. Температура воздуха, С	±(0,5-0,7)	±0,5
2. Атмосферное давление, гПа	±0,3	±0,2
3. Относительная влажность воздуха, %	4-7	2-4

В настоящее время для большинства обжитых районов размещение пунктов с приземными метеонаблюдениями близко к оптимальному.

В необжитых районах сеть метеонаблюдений еще слабо развита. Поэтому для труднодоступных районов широко используется система спутниковых наблюдений или космическая система наблюдений.

4.4. Схема строения атмосферы

Атмосфера (*atmos* – пар+сфера) – это воздушная оболочка вокруг Земли, которая, без учета примесей и водяных паров, состоит из механической смеси (в основном 10 типов газов) и вращается вместе с Землей. Масса атмосферы ~ $5{,}27 * 10^{15}$ т.

Состав чистого, без примесей и водяного пара, атмосферного воздуха (сухого) представлен в табл. 4.2.

Основными газами являются азот, кислород и аргон, содержание которых в атмосфере пока считается неизменным, то есть так называемые постоянные газы.

Газы, которые изменяют свое содержание в атмосфере, называются переменными. К этим газам относятся водяной пар, углекислый газ и озон.

Водяной пар является важной составляющей воздуха, так как играет одну из главных ролей в круговороте тепла и влаги в атмосфере. Он содержится в нижних слоях атмосферы и колеблется по объему от 0,1 до 4%. В атмосферу водяной пар поступает в результате испарения влаги с водных поверхностей, суши, растительного покрова, с поверхности снега и ледников.

Таблица 4.2

Состав атмосферного воздуха
(без примесей и водяного пара)

Газ	% в единице объема
Азот	78,09
Кислород	20,95
Аргон	0,93
Углекислый газ	0,03
Неон	0,0018
Гелий	0,0005
Криптон	0,0001
Ксенон	0,000008
Водород	0,00005
Озон	0,000007

Большая часть водяного пара находится в самых нижних слоях атмосферы. С высотой содержание водяного пара быстро убывает. Благодаря водяному пару в атмосфере образуются облака, из которых выпадают осадки.

Водяной пар поглощает радиацию, излучаемую земной поверхностью, и тем самым защищает ее от сильного охлаждения.

Углекислый газ в составе воздуха изменяется в пределах 0,02-0,03 % по объему. Он поступает в атмосферу при вулканических извержениях, при разложении органических веществ и в процессе их гниения, жизнедеятельности животных и растений и при сжигании топлива.

Расходуется углекислый газ на питание растений. Углекислый газ хорошо поглощает и излучает длинноволновую энергию солнечных лучей.

Озон – это трехатомный кислород. В нижних слоях атмосферы озон образуется при грозовых разрядах и окислении некоторых органических веществ, в верхних слоях – под действием ультрафиолетовых лучей Солнца. В верхних слоях атмосферы озона больше, чем в нижних, но все равно озоновый слой очень небольшой. Так, если весь озон собрать в один сплошной слой, то при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0 °С толщина этого слоя составила бы около 3 мм.

Наибольшее количество озона – на высоте 22-26 км, далее количество озона уменьшается в направлении как к высоким слоям, так и к земной поверхности.

Количество озона в атмосфере в течение года непостоянно: больше всего – весной и меньше – осенью. Кроме того, озона больше в северных широтах и меньше в южных.

Озон имеет большое значение для жизни на Земле. Он поглощает в высоких слоях коротковолновые (ультрафиолетовые) солнечные лучи, которые в случае проникновения на Землю оказали бы губительное действие на живые организмы.

В то же время озон является регулятором поступающей на Землю ультрафиолетовой радиации, которая в определенных количествах необходима для органичес-

кой жизни. Вообще, озон непосредственно в небольших количествах оказывает положительное влияние на организм человека. При повышенных концентрациях он становится вредным как для растительного, так и животного мира.

Аэрозоли и антропогенные вещества также имеются в атмосфере.

Аэрозолями называются твердые и жидкие частицы, взвешенные в атмосфере. Концентрация аэрозолей может меняться в широких пределах в зависимости от местных условий и времени года. Они играют важную роль для конденсации водяного пара и поэтому в данном случае называются ядрами конденсации. Аэрозоли могут быть естественного и антропогенного происхождения.

Естественные аэрозоли – это водяные капли и ледяные кристаллы, образующиеся в результате конденсации водяного пара, а также пыль, сажа и пепел, попадающие в воздух при лесных пожарах и горении торфяников. К естественным аэрозолям относятся также почвенная, космическая и вулканическая пыль, пыльца растений.

Аэрозоли антропогенного происхождения образуются при загрязнении атмосферы в результате хозяйственной деятельности человека. Это, прежде всего, промышленные предприятия, которые выбрасывают в атмосферу большое количество каменноугольной смолы, органических кислот, углеводородов, вредных газов. Кроме того, существенное загрязнение атмосферы оказывают автотранспорт и химические заводы.

Необходимо учитывать, что аэрозоли могут переноситься на значительные расстояния воздушными потоками и из загрязненных районов перемещаться в экологически чистые области, нарушая в них экологический баланс.

Смог характерен для атмосферы больших городов, который представляет собой сильно загрязненный воздух.

Различают два типа смога: густой туман с примесью дыма и газовых отходов предприятий и пелена ядовитых

газов и аэрозолей повышенной концентрации (без тумана), возникающая в воздухе в результате фотохимических реакций, происходящих в газовых выбросах автомашин и химических предприятий под действием ультрафиолетовой радиации Солнца (фотохимический смог).

Для образования смога характерна слабая турбулентность воздуха, слабый ветер и повышенная температура воздуха.

Атмосферу также загрязняют радиоактивные вещества, являющиеся отходами предприятий атомной промышленности, а также возникающие при ядерных и термоядерных взрывах. Радиоактивные вещества могут находиться в атмосфере десятки и сотни лет, причем до настоящего времени не найдены способы искусственного удаления радиоактивных веществ из атмосферы.

В атмосфере постоянно образуются электрически заряженные частицы, называемые легкими ионами. Кроме того, в высоких слоях атмосферы имеют место и так называемые свободные электроны. Благодаря наличию ионов и свободных электронов, атмосфера обладает электропроводностью.

Таким образом, состав атмосферы носит сложный характер.

Исследования показывают, что до высоты примерно 100 км состав атмосферы практически не меняется. Объясняется это тем, что в результате вертикальных и горизонтальных перемещений воздуха происходит интенсивное его перемешивание.

Выше 100 км состав воздуха значительно меняется, так как не наблюдаются процессы его интенсивного перемешивания.

На высоте 1000 км и выше атмосфера состоит главным образом из гелия и водорода.

Важно отметить, что атмосфера не имеет верхней границы. Она плавно и постепенно переходит в межпланетную среду. Условно границей атмосферы можно считать высоту 1000-1200 км. На высоте от 2000 до 3000 км плотность атмосферы приближается к плотности межпланетной среды.

Большая часть атмосферы сосредоточена в относительно небольшом слое, прилегающем к земной поверхности. Так, половина всей массы атмосферы сосредоточена в слое до высоты около 5,5 км, 75% всей массы – до высоты около 11 км и 95% – до высоты 20 км.

Исследования показали, что атмосфера по вертикали неоднородна и в различных ее слоях имеются значительные колебания температуры и давления (рис. 4.2).

По признаку вертикального изменения температуры воздуха в атмосфере можно выделить пять основных слоев (сфер): тропосфера (от поверхности Земли до высоты в среднем 13 км), стратосфера (от 13 до 50-55 км), мезосфера (от 50-55 до 90 км), термосфера (от 90 км до 450 км) и экзосфера (свыше 800 км).

Между слоями имеются прослойки, которые являются переходными промежутками от одной характерной сферы к другой и соответственно называются тропопауза, стратопауза, мезопауза и термопауза. Высота этих прослоек колеблется от нескольких сотен метров до 1-2 км.

Тропосфера (по-гречески «*tropos*» означает «вращение», «перемешивание») – самый нижний слой атмосферы, начинающийся от земной поверхности. Ее высота зависит от времени года, широты места и характера циркуляции воздуха.

Воздух в тропосфере находится в непрерывном движении как по горизонтали, так и по вертикали. При этом происходит интенсивное его перемешивание.

В тропосфере сосредоточена основная масса водяного пара, происходит образование облаков, выпадение осадков в виде снега и дождя, возникают циклоны и антициклоны.

Характерной особенностью тропосферы является убывание температуры с высоты. В среднем на каждые 100 м высоты температура понижается на 0,6 °С.

Среднегодовая температура на верхней границе тропосферы составляет -50-60 °С в умеренных широтах, -75 °С – температура над экватором, -65 °С – температура над Северным полюсом зимой и –47 °С – температура летом.

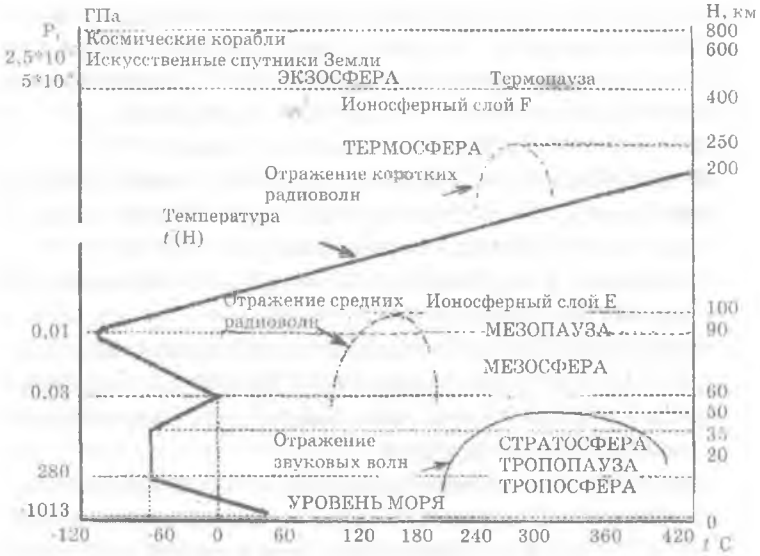


Рисунок 4.2. *Вертикальная структура атмосферы*

Внутреннюю часть тропосферы условно можно разделить на три слоя.

Средний слой тропосферы располагается на высоте от 2 до 6 км. Здесь меньше проявляется влияние земной поверхности. В этом слое происходит основной перенос воздушных масс по горизонтали.

Верхний слой находится на высоте от 6 км до тропопаузы. В нем очень слабо проявляется влияние земной поверхности. Температура в этом слое всегда отрицательная.

Выше тропосферы располагается **тропопауза**. За ее нижнюю границу принимается высота, на которой температура перестает понижаться, наступает ее постоянство (изотермия) или начинается ее повышение (инверсия).

Над тропосферой после тропопаузы располагается **стратосфера**, которая характеризуется ростом температуры. Причем до высоты 35 км рост температуры происходит очень медленно и практически повышается от -60 °С до -55 °С. Это так называемый изотермический

слой. Постоянство температуры объясняется равновесием между притоком и оттоком тепла солнечной радиации.

Выше 35 км примерно до 60 км происходит быстрый рост температуры (инверсия), которая на верхней границе стратосферы достигает среднегодового значения, равного 0 °С с возможным отклонением ±20 °С. Рост температуры воздуха с высотой в стратосфере объясняется поглощением солнечной радиации слоем озона. Этот слой стратосферы называется теплым слоем.

Водяной пар в стратосфере практически отсутствует, поэтому обычные облака в этом слое не образуются.

Стратопауза располагается над стратосферой. За ее нижнюю границу можно принять прекращение повышения температуры и постепенный переход к следующему слою – мезосфере.

Мезосфера распространяется до высоты 90 км. Характерным для этого слоя является понижение температуры до –90 °С. Скорость ветра в мезосфере достигает 150 м/с. Уменьшение температуры с высотой свидетельствует о наличии в мезосфере интенсивного перемешивания воздуха.

Над мезосферой расположена *мезопауза*, которая характерна тем, что в ней происходит прекращение снижения температуры и начало ее роста.

Выше лежит **термосфера**, в которой температура с высотой возрастает. В термосфере имеется слой с высокой электрической проводимостью, образовавшийся в результате ионизации воздуха солнечной радиацией, называемый **ионосферой**, которая имеет нижнюю границу на высоте 50-80 км и верхнюю – на высоте 400 км.

Нижняя граница ионосферы называется ионосферным слоем Е. Верхняя граница – ионосферный слой F.

Выше термосферы располагается *термопауза* и далее находится слой атмосферы, называемый экзосферой.

Экзосфера (сфера рассеяния) – это внешний слой атмосферы, постепенно переходящий в межпланетное пространство.

По составу атмосфера делится на гомосферу и гетеросферу.

Гомосфера располагается от земной поверхности до высоты примерно 100 км. В этом слое состав основных газов не меняется с высотой. Остается постоянной и молекулярная масса воздуха.

Гетеросфера располагается выше 100 км. В ней кислород и азот находятся в атомарном состоянии. Молекулярная масса воздуха в гетеросфере с высотой уменьшается.

Слой атмосферы, расположенный между высотами 10 и 50 км и содержащий основную массу озона, называется озоносферой.

По характеру взаимодействия с земной поверхностью атмосферу разделяют на два слоя: пограничный – это нижний слой высотой от поверхности земли 1-1,5 км и слой свободной атмосферы, расположенный выше пограничного слоя. Пограничный слой характеризуется суточными изменениями метеорологических величин. Здесь на характер движения воздуха оказывает влияние его трение о земную поверхность.

Самую нижнюю часть пограничного слоя высотой 50-100 м, непосредственно контактирующую с земной поверхностью, называют *приземным слоем*.

По условиям полета искусственных спутников и космических кораблей атмосферу делят на плотные слои атмосферы до высоты 150 км и околоземное космическое пространство, нижняя граница которого располагается на высоте около 150 км. Сопротивление плотных слоев атмосферы настолько велико, что летательный аппарат с выключенным двигателем не может совершить даже один оборот вокруг Земли, быстро теряет скорость и сгорает в плотных слоях атмосферы.

4.5. Приборы для измерения солнечной радиации

Ряды данных наблюдений за различными видами солнечной радиации имеют свои особенности, связанные со спецификой наблюдений. Прежде всего, наблюдения про-

водятся в сроки, отличные от сроков, установленных для наблюдения за другими метеорологическими величинами.

Измерения составляющих радиационного баланса производятся 6 раз в сутки: в 0 ч 30 мин.; 6 ч 30 мин.; 9 ч 30 мин.; 12 ч 30 мин.; 15 ч 30 мин.; 18 ч 30 мин. Наблюдения в срок не позволяют получить достаточно надежные данные. Стоит в момент наблюдения небольшому облачку прикрыть солнце, как измеряемое значение прямой солнечной радиации резко изменится. По этой причине, а также исходя из практической необходимости получать суммарный приход солнечного тепла за некоторый отрезок времени (час, сутки, месяц), при климатологической обработке, наряду с характеристиками интенсивности солнечной радиации (энергетической освещенности), рассчитывают характеристики сумм солнечной радиации за часовые интервалы, сутки, месяц.

Характеристики часовых сумм получают либо по данным самописцев (которые имеются примерно на 1/3 актинометрических станций), либо с использованием графиков суточного хода. Такие графики строятся по многолетним средним значениям радиации в сроки наблюдений. С графика для середины часового интервала снимаются значения интенсивности и по этим данным определяются часовые и суточные суммы. Месячные суммы вычисляются как произведение суточного значения на число календарных дней месяца.

В климатических справочниках помещают обычно следующие климатические показатели:

- средняя интенсивность (энергетическая освещенность в кВт/м^2) прямой, рассеянной, суммарной радиации и радиационного баланса при ясном небе и при средних условиях облачности;
- средние суммы прямой солнечной радиации (МДж/м^2) на нормальную к лучу поверхность и на горизонтальную поверхность при ясном небе и средних условиях облачности;
- средние суммы суммарной солнечной радиации (МДж/м^2) на горизонтальную поверхность при ясном небе и средних условиях облачности;

• средние суммы рассеянной солнечной радиации (МДж/м^2) на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности;

• альбедо деятельной поверхности (%) при средних условиях облачности;

• средние суммы радиационного баланса деятельной поверхности (МДж/м^2) при средних условиях облачности.

Средние значения интенсивности солнечной радиации при ясном небе получают при следующих условиях: для рассеянной, суммарной радиации и радиационного баланса – общая облачность не более 2 баллов, солнечный диск и околосолнечная зона радиусом 5° свободны от облаков и следов облаков; для прямой радиации – независимо от облаков, но при диске солнца и околосолнечной зоне 5°, свободных от облаков и их следов.

Характеристики интенсивности солнечной радиации при средних условиях облачности получают путем непосредственного подсчета, по данным наблюдений, при любых условиях облачности и состояния диска солнца.

Наряду со средними значениями характеристик солнечной радиации вычисляют также средние квадратические отклонения, коэффициенты асимметрии и корреляции суточных сумм радиации (в последнем научно-прикладном справочнике эти характеристики вычислены только для суммарной радиации).

Для прикладных целей рассчитывают климатические характеристики сумм солнечной радиации на вертикальные и наклонные поверхности.

Приборы для измерения солнечной радиации можно разделить на две основные группы: пиргелиометры, используемые для измерений направленного потока излучения H_b, и пиранометры, или солариметры, – для измере-ний полного потока H_{tc}.

В табл. 4.3 приведены основные характеристики приборов, используемых для измерений солнечной энергии.

Первыми стандартными приборами для измерения прямой солнечной радиации были пиргелиометр Ангстрема, разработанный в Стокгольме, и проточный кало-

риметр Аббота из Смитсонианского института в Вашингтоне. В пиргелиометре Ангстрема приводятся в соответствие тепловые эффекты облучения приемника солнечной энергии и электронагрева затененного элемента. Для измерения уровня электронагрева используются обычные методы электрических измерений. Проточный калориметр Аббота имеет полость, которая поглощает солнечное излучение, а повышение температуры циркуляционной охлаждающей воды пропорционально интенсивности падающего излучения. Пиргелиометр Аббота с серебряным диском является еще одним стандартным прибором, в котором скорость изменения температуры диска приближенно пропорциональна интенсивности падающего излучения. В течение многих лет отмечалось, что американские и европейские измерения радиации не согласуются между собой, и, как указывали различные исследователи во многих странах, расхождение составляло от 2,5 до 6%. В сентябре 1956 г. была установлена новая Международная пиргелиометрическая шкала 1956, которая внесла поправки +1,5% к шкале Ангстрема и -2,0% к смитсонианской шкале Аббота. Впоследствии все приборы калибровались в соответствии с Международной пиргелиометрической шкалой 1956.

Принцип действия большинства пиранометров, которые используются для измерения суммарной радиации, а при затенении от прямых лучей и диффузной радиации, основан на измерении разности температур черных (поглощающих излучение) и белых (отражающих излучение) поверхностей с помощью термоэлементов. Последние дают сигнал в милливольтах, который можно легко контролировать с помощью целого ряда стандартных самопишущих систем. Характерным примером такого типа приборов является пиранометр Эппли. Другой, хорошо известный тип пиранометра – пиранометр Робича – основан на различном расширении биметаллического элемента, тогда как с помощью дистилляционного пиранометра Беллани, в котором спирт конденсируется в калиброванном конденсаторе, измеряется суммарная солнеч-

ная радиация за данный промежуток времени. Значительно более простые измерения, которые проводятся во многих местах, связаны с определением продолжительности солнечного сияния, т. е. времени, когда диск Солнца не закрыт облаками или дымкой. Она измеряется с помощью самопишущего прибора Кэмпбелла-Стокса, в котором используется сферическая линза, фокусирующая солнечное излучение на термочувствительной бумаге. При наличии прямой солнечной радиации на бумаге появляется след в виде прожога.

Таблица 4.3

Классификация солнечных радиометров

Тип	Что измеряет	Стабильность, %, в год	Абсолютная точность, %	Типичный отклик при плотности потока 1кВт · м ^{2}
Эталонный стандартный пирогелиометр	Направленное излучение (абсолютные измерения, сравнение с нагревом поверхности то ком)	0,2	2	-
Солариметр 1-го класса	Суммарное излучение, H_1	1	3	10 мВ
Биметаллическая пластина	Суммарное излучение, H_1	5	15	Отклонение на 5 см
Солнечные элементы	Суммарное излучение, H_1	2	15	10 мА
Актинометр 2-го класса	Прямое излучение, H_b	2	4	10 мА
Самописец	Количество солнечных часов	10	20	Прожженная карточка
Глаз человека	Облачность, %	10	20	Визуальная шкала
Фотографирование со спутника	Облачность, %	10	20	Фотопленка

На рис. 4.3 представлены способы измерения различных составляющих солнечного излучения. При этом предполагается, что детектором является зачерненная поверхность единичной площади с фильтром, обрезающим длинноволновое излучение.

Климатологическими показателями солнечного сияния, регистрируемого гелиографом, служат:

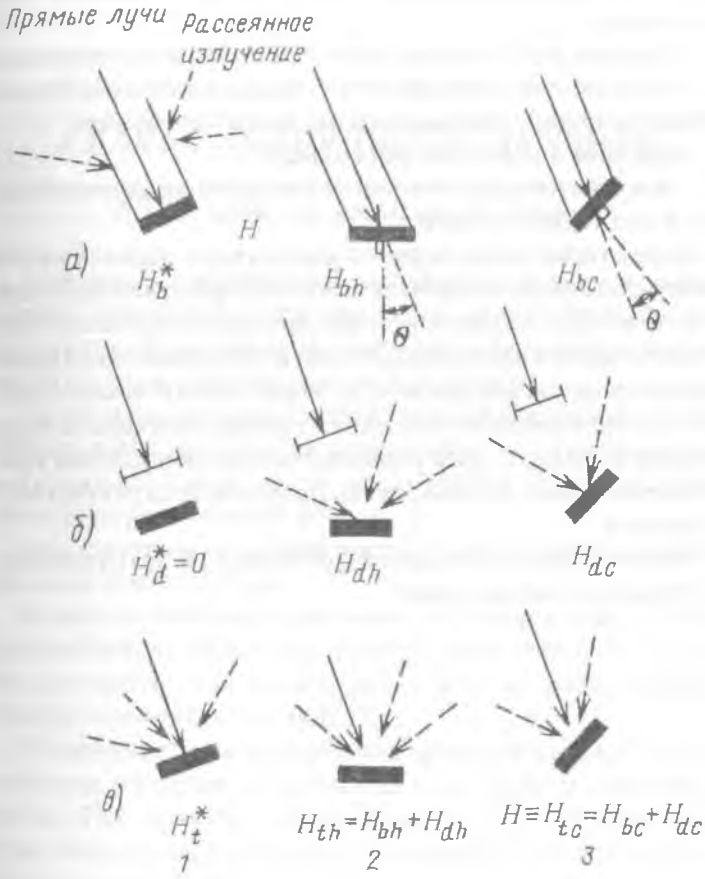


Рисунок 4.3. Способы измерения различных составляющих солнечного излучения:
а) регистрируются только прямые лучи;
б) регистрируется только диффузная составляющая;
в) регистрируется суммарное излучение: 1 – приемная площадка, перпендикулярная потоку излучения;
2 – горизонтальная приемная площадка;
3 – произвольный угол наклона приемника

· средняя общая продолжительность солнечного сияния (часы и %);

· средняя продолжительность сияния в день с солнцем;

· среднее месячное значение продолжительности солнечного сияния для каждого часового интервала;

· среднее число дней без солнца;

· среднее квадратическое отклонение продолжительности солнечного сияния.

Характеристики первого показателя вычисляются непосредственным подсчетом за весь период наблюдений. Относительная характеристика продолжительности солнечного сияния представляет собой отношение наблюдавшейся продолжительности к теоретически возможной, т. е. продолжительности сияния при безоблачном небе от восхода до захода. Для горных станций возможная продолжительность исправляется поправкой на закрытость горизонта.

Вычисление остальных характеристик затруднений, как правило, не вызывает.

ГЛАВА 5. СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

5.1. Солнце как источник излучения

Основным источником энергии практически всех природных процессов, происходящих на поверхности Земли и в атмосфере, является энергия, поступающая на Землю от Солнца в виде солнечной радиации.

Солнце представляет собой газовый шар радиусом 695 300 км, в 109 раз больше радиуса Земли, с температурой излучающей поверхности около 6000 °С. Внутри Солнца температура достигает 40 млн. °С.

Расстояние между центрами Земли и Солнца равно в среднем $1{,}496*10^8$ км.

Земля и атмосфера получают от Солнца в год $1{,}3*10^{24}$ калорий тепла. Такого количества тепла хватило бы, чтобы растопить слой льда толщиной 35 м, покрывающий земную поверхность при 0 °С.

В сравнении с солнечной радиацией все остальные источники энергии, поступающей на Землю, ничтожно малы. Так, энергия звезд составляет одну стомиллионную часть солнечной энергии; космическое излучение – две миллиардные доли. Внутреннее тепло, поступающее из глубины Земли на ее поверхность, составляет одну десятитысячную часть солнечной энергии.

Таким образом, Солнце является фактически единственным источником тепловой энергии на Земле.

Земля вращается вокруг Солнца по эллиптической орбите, поэтому расстояние между Солнцем и Землей в течение года не остается постоянным. Минимальное расстояние от Земли до Солнца приходится на 2 января, а максимальное – на 4 июля.

Ось вращения Земли имеет наклон, равный 66,5 , причем в период вращения Земли вокруг Солнца он остается постоянным, что обусловливает смену времен года.

Видимая поверхность Солнца, излучающая радиацию, называется **фотосферой** (сфера света). Она состоит из раскаленных паров различных химических элементов, находящихся в ионизированном состоянии.

Над фотосферой находится светящаяся, практически прозрачная атмосфера Солнца, состоящая из разряженных газов, которая называется **хромосферой**.

Над хромосферой располагается внешняя оболочка Солнца, называемая **короной**.

Газы, образующие Солнце, находятся в состоянии непрерывного бурного (интенсивного) движения, что обусловливает появление так называемых солнечных пятен, факелов и протуберанцев.

Солнечные пятна представляют собой большие воронки, образовавшиеся в результате вихревых движений масс газа, скорость которых достигает 1-2 км/с. Температура пятен на 1500 С ниже температуры Солнца и составляет около 4500 С. Количество солнечных пятен изменяется из года в год с периодом около 11 лет.

Солнечные факелы – это выбросы солнечной энергии, а **протуберанцы** – колоссальной силы взрывы в хромосфере Солнца, достигающие высоты до 2 млн. км.

Наблюдения показали, что с увеличением количества солнечных пятен увеличивается количество факелов и протуберанцев и соответственно увеличивается солнечная активность.

С увеличением солнечной активности на Земле происходят магнитные бури, которые оказывают отрицательное воздействие на телефонную, телеграфную и радиосвязь, а также на условия жизнедеятельности. С этим же явлением связано увеличение полярных сияний.

Следует отметить, что в период увеличения солнечных пятен, интенсивность солнечной радиации сначала увеличивается, что связано с общим увеличением солнечной активности в начальный период, а затем солнечное излучение уменьшается, так как увеличивается площадь

солнечных пятен, имеющих температуру на 1500° ниже температуры фотосферы.

Часть метеорологии, изучающая влияние солнечной радиации на Земле и в атмосфере, называется **актинометрией.**

При актинометрических работах необходимо знать положение Солнца на небесном своде. Это положение определяется высотой или азимутом Солнца.

Высотой Солнца *hc* называется угловое расстояние от Солнца до горизонта, то есть угол между направлением на Солнце и плоскостью горизонта.

Угловое расстояние Солнца от зенита, то есть от его вертикального направления, называется *азимутом*, или *зенитным* расстоянием.

Между высотой и зенитным расстоянием существует соотношение:

$$hc + Z = 90^{\circ}. \tag{5.1}$$

Азимут Солнца определяется редко, только для специальных работ.

Высота Солнца над горизонтом определяется по формуле:

$$\sin \quad hc = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos t, \tag{5.2}$$

где $-\varphi$ широта места наблюдений; δ – склонение Солнца – это дуга круга склонений от экватора до Солнца, которая отсчитывается, в зависимости от положения Солнца, в обе стороны от экватора, от 0 до $\pm 90^{\circ}$; t – часовой угол Солнца или истинное солнечное время в градусах.

Величина склонения Солнца на каждый день приводится в астрономических справочниках за многолетний период.

По формуле (5.2) можно вычислить для любого времени t высоту Солнца *hc* или по заданной высоте *hc* определить время, когда Солнце бывает на данной высоте.

Максимальная высота Солнца в полдень для различных дней года вычисляется по формуле:

$$hc = 90 - (\varphi - \delta). \tag{5.3}$$

5.2. Основные законы солнечной энергии

Поверхность любого тела может как излучать, так и поглощать энергию.

Излучательной способностью e называется количество энергии, излучаемой 1 см^2 поверхности тела в единицу времени, кал/(кв. см^2 *с).

Излучательная способность зависит от природы тела, абсолютной температуры T и λ длины волны.

Поглощательной способностью тела k_2 называется количество энергии в относительных единицах, которое поглощается телом из общего количества падающей на него энергии.

По закону Кирхгофа, отношение излучательной способности тела e_λ для определенной длины волны 2 и абсолютной температуры T.к его поглощательной способности $k_{\lambda T}$ есть величина постоянная, равная излучательной способности абсолютно черного тела при тех же условиях:

$$e_{\lambda T} / k_{\lambda T} = E_{\lambda T}, \qquad (5.4)$$

Величина зависит только от длины волны и абсолютной температуры и не зависит от природы тела.

Для абсолютно черного тела:

$$k_{\lambda 1} = 1 \quad и \quad e_{\lambda T} = E_{\lambda 1}$$

Из анализа закона Кирхгофа следует, что если тело излучает энергию данной длины волны A при заданной температуре T, то оно и поглощает энергию при той же температуре и длине волны. Тело, хорошо поглощающее энергию, хорошо ее излучает и наоборот.

Закон Кирхгофа называется избирательным законом поглощения. Это означает, что тело поглощает только те лучи, которые оно излучает.

Все тела в природе не являются абсолютно черными, т.е. имеют $k_{\lambda T} < 1$ и излучают лишь определенную долю излучения абсолютно черного тела при той же температуре.

По закону Стефана-Больцмана, полная излучательная способность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$E = \sigma T^4, \qquad (5.5)$$

где V – постоянный коэффициент, равный 8,26 * 10^{-11} кал/(см^2 * мин).

Согласно закону смещения Вина, произведение длины волны максимального излучения A_m на абсолютную температуру тела есть величина постоянная:

$$\lambda_m T = 2884 мкм * град. \qquad (5.6)$$

Из формулы (5.3) следует, что чем выше температура тела, тем более коротковолновые лучи оно излучает и наоборот.

Таким образом, при изменении температуры тела максимум энергии в его спектре смещается. Поэтому закон Вина называют законом смещения. По закону Вина можно определить температуру излучающей поверхности Солнца.

Максимальное излучение Солнца приходится на длину волны, равную 0,475 мкм. Тогда, подставив это значение длины волны в формулу (5.3), получим, что температура Солнца равна 6072 °С.

5.3. Космическое солнечное излучение

Вследствие реакций ядерного синтеза в активном ядре Солнца достигаются температуры до 10^7 К; спектральное распределение потока излучения из ядра неравномерно. Это излучение поглощается внешними неактивными слоями, нагретыми до T = 5800 К, в результате чего спектральное распределение солнечного излучения становится относительно непрерывным.

Наибольшая плотность потока солнечного излучения, приходящегося на Землю, составляет примерно 1 кВт/м^2 в диапазоне длин волн 0,3-2,5 мкм. Это излучение назы-

вается коротковолновым и включает видимый спектр. Для населенных районов, в зависимости от места, времени суток и погоды, потоки солнечной энергии, достигающие Земли, меняются от 3 до 30 МДж/м^2 в день.

Солнечное излучение характеризуется энергией фотонов в максимуме распределения порядка 2 эВ, определенной по температуре поверхности Солнца около 6000 К. Это энергетический поток от доступного источника гораздо более высокой температуры, чем у традиционных технических источников. Излучение распространяется со скоростью $3x10^8$ м/с и достигает земной атмосферы примерно за 8 минут. Тепловая энергия его может быть использована с помощью стандартных технических устройств (например: паровых турбин) и методами, разработанными на основе фотохимических и фотофизических взаимодействий.

Потоки энергии излучения, связывающие атмосферу с поверхностью Земли, также порядка 1 кВт/м^2, но они перекрывают другой спектральный диапазон – от 5 до 25 мкм, называемый длинноволновым – с максимумом около 10 мкм. По спектру коротко- и длинноволновое излучения расположены друг от друга достаточно далеко и могут быть легко различимы.

На рис. 5.1 показано спектральное распределение лучистой энергии на среднем расстоянии от Солнца до Земли, не искаженное влиянием атмосферы. Видно, что это распределение по форме, длине волны в максимуме и полной энергии излучения подобно распределению интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 5800 К. Площадь под этой кривой равна солнечной постоянной G = 1353 Вт/м^2, которая представляет собой плотность потока излучения, падающего на площадку, перпендикулярную этому потоку и расположенную над атмосферой на расстоянии 1,496 10 км от Солнца (среднее расстояние от Земли до Солнца).

На самом деле плотность потока излучения, достигающего верхней границы атмосферы, отличается от солнечной постоянной, вследствие флуктуаций потока сол-

нечной энергии менее чем на ±1,5% и вследствие предсказуемых изменений расстояния между Землей и Солнцем, вызванных слабой эллиптичностью земной орбиты, – на 4% в течение года.

Солнечный спектр можно разделить на три основные области:

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

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

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

Вклад в поток солнечной радиации излучения с длиной волны больше 2,5 мкм пренебрежительно мал, поэтому все три области относятся к коротковолновому излучению.

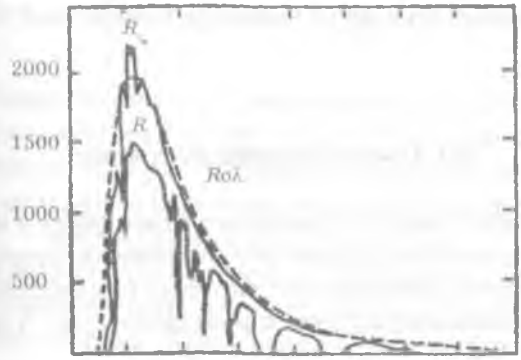


Рисунок 5.1. *Интенсивность прямого солнечного излучения в зависимости от длины волны:*
R_0 – интенсивность прямого солнечного излучения за пределами атмосферы; R – на уровне моря;
Roλ – излучение абсолютно черного тела

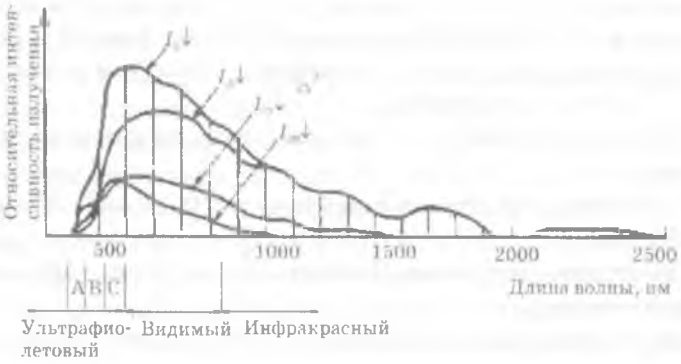


Рисунок 5.2. *Спектральный состав суммарной радиации при безоблачном небе*

Спектральный состав суммарной радиации при безоблачном небе, рассчитанный для горизонтальной поверхности (кривые относятся к высоте Солнца над горизонтом 30°).

5.4. Составляющие излучения

Солнечная энергия достигает атмосферы в виде направленного потока солнечного космического излучения. На поверхности Земли регистрируется как прямой поток, так и рассеянное атмосферой излучение (рис. 5.3).



Рисунок 5.3. *Поступление солнечного излучения на Землю*

Суммарная солнечная радиация включает в себя два вида излучения, падающего на горизонтальную плоскость, – прямое и рассеянное. Прямая солнечная радиация представляет собой поток излучения, поступающего непосредственно от солнечного диска (который можно рассматривать как точечный источник) и измеряемого в плоскости, перпендикулярной направлению на Солнце. Рассеянная радиация поступает на земную поверхность от остальной части небесной полусферы, претерпевая рассеяние при прохождении через атмосферу. Радиация может также отражаться от поверхности земли на любую наклонную поверхность. Однако этот поток весьма трудно поддается оценке.

Соотношение между прямой, рассеянной и суммарной радиацией имеет вид:

$$H = H_N \cdot \sin\gamma + H_d = H_D + H_d, \qquad (5.7)$$

где H_N – прямая солнечная радиация на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам; H_D – прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность; H_d – рассеянная солнечная радиация на горизонтальную поверхность; γ – высота Солнца над горизонтом.

На практике прямые лучи от диффузной составляющей отличаются тем, что направленный поток может быть сфокусирован. Даже в ясный день имеется некоторое количество рассеянного излучения. Отношение интенсивности направленного потока к полной интенсивности излучения меняется от 0,9 в ясный день до 0 – в очень пасмурный день.

На рис. 5.4 показано спектральное распределение коротковолнового излучения Солнца и длинноволнового излучения Земли. На рис. 5.5 – процессы, происходящие при прохождении солнечного излучения сквозь атмосферу, а на рис. 5.6 – годовой радиационный баланс Земли.

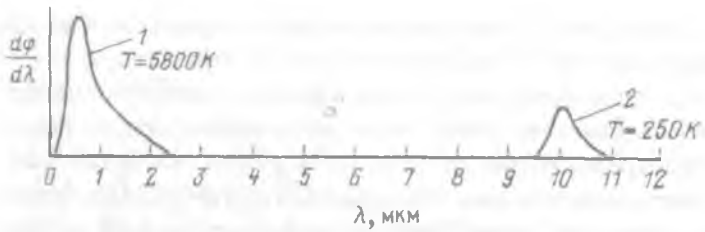


Рисунок 5.4. *Спектральное распределение коротковолнового и длинноволнового излучений*
1 – распределение коротковолнового излучения Солнца;
2 – распределение длинноволнового излучения Земли

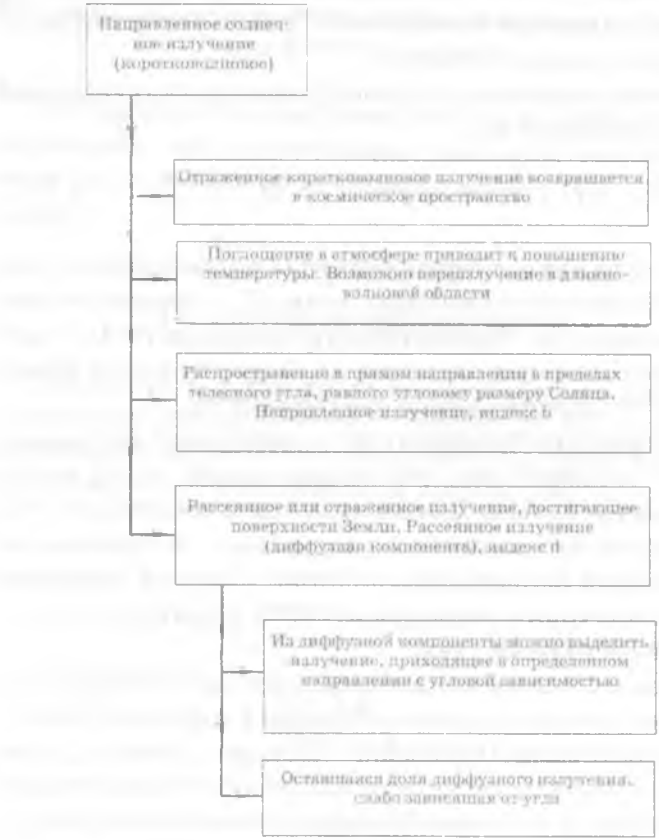


Рисунок 5.5. *Прохождение солнечного излучения сквозь атмосферу*



Рисунок 5.6. *Годовой радиационный баланс Земли (баланс отнесен к 100 % солнечной радиации, приходящейся на верхнюю границу атмосферы):*
а – коротковолновая солнечная радиация;
б – длинноволновая радиация Земли

5.5. Геометрия Земли и Солнца

Земля обращается за 24 ч вокруг своей оси (рис. 5.7), которая обозначена точками северного и южного полюсов N и S. Ось перпендикулярна экваториальной плоскости Земли. На рис. 5.7 точка C – центр Земли. Точка P на поверхности Земли характеризуется широтой и долготой. Величина положительна для точек, лежащих севернее экватора, отрицательна – для точек южнее экватора. Долгота положительна к востоку от Гринвича (Великобритания). Вертикальная плоскость, построенная с севера на юг через точку P, – локальная меридиальная плоскость. Точки E и G на рис. 5.7 – точки на экваторе, имеющие те же долготы, что и точка P, и Гринвич соответственно.

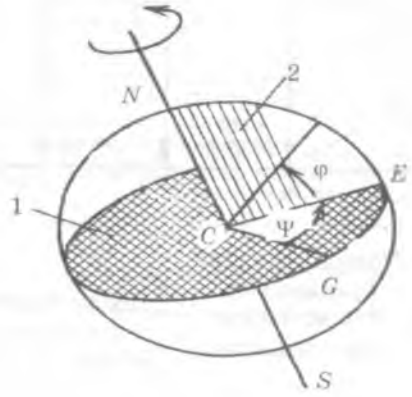


Рисунок 5.7. *Схема обращения Земли вокруг своей оси*

Для расчетов количества поступающей солнечной энергии необходимо знать углы падения солнечных лучей на наклонную и горизонтальную поверхности в данной точке. Положение некоторой точки А на земной поверхности определяется тремя основными углами: широтой φ, склонением δ и часовым углом ω (рис. 5.8).

Широта φ – это угол между линией, соединяющей точку А с центром Земли и ее проекцией на плоскость экватора.

Часовой угол ω – это угол, измеренный в экваториальной плоскости между проекцией линии АО и проекцией линии, соединяющей центры Земли и Солнца. Угол $\omega = 0$ в солнечный полдень (при совпадении декретного и солнечного времени).

Склонение Солнца δ – это угол между линией, соединяющей центры Земли и Солнца, и ее проекцией на плоскость экватора.

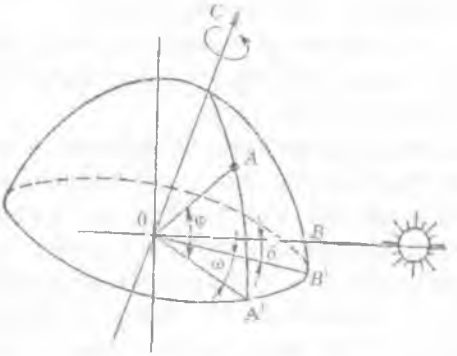


Рисунок 5.8. *Схема определения широты и долготы: 1 – экваториальная плоскость; 2 – меридиальная плоскость*

Один раз каждые 24 ч Солнце попадает в меридиальную плоскость. Это полдень по солнечному времени для всех точек, имеющих данную долготу. Полдень по солнечному времени не обязательно совпадает с двенадцатью часами, поскольку часы показывают так называемое *декретное время*, установленное единым для больших пространств местности в пределах 15 долготы, называемой часовым поясом. Перевод часов на летнее время означает, что солнечное и декретное время могут различаться более чем на 1 ч. Более того, эллиптичность земной орбиты приводит к тому, что период между солнечными полднями составляет не точно 24 ч, хотя в среднем этот интервал составляет 24,0000 ч. Поправка не превышает 15 мин. Часовой угол в точке Р есть угол, на который Земля поворачивается с момента солнечного полдня. Так как

Земля поворачивается на (360°/24 ч)=15° за 1ч , то часовой угол определяется выражением:

$$\omega = (15^\circ ч^{-1})(t_{solar} - 12\,ч) = (15^\circ ч^{-1})(t_{zone} - 12ч) + \omega_{eq} + (\psi_0 - \psi_{zone}), \quad (5.8)$$

где t_{solar} и t_{zone} – соответственно, локальное солнечное и декретное время, (в часах); ψ_0 – долгота, на которой находится Солнце, когда t_{zone} соответствует полдню (когда солнечное и декретное время совпадают).

Малым поправочным членом ω_{eq} чаще всего можно пренебречь. Согласно (5.8), угол положителен вечером и отрицателен в утренние часы.

Для определения времени истинного солнечного полдня, т.е. времени, когда наступает полдень и Солнце находится точно на юге, необходимо знать уравнение времени (положительная или отрицательная поправка, которую нужно добавить или вычесть из среднего солнечного времени, показываемого равномерно идущими часами). В табл. 5.1 приведены месячные изменения угла склонения Солнца и уравнение времени.

Таблица 5.1

Месячные колебания угла склонения Солнца и уравнение времени

Дата	Угол склонения Солнца	Уравнение времени
21 декабря	- 23°27′	+ 1′ 32″
15 января	- 21°17′	- 9′ 00″
15 февраля	- 12° 58′	- 14′ 30″
15 марта	- 2° 23′	- 9′ 30″
21 марта	000	- 7′ 19″
15 апреля	+ 9° 33′	-0′ 30″
15 мая	+18° 44′	+ 4′ 00″
15 июня	+23° 17′	0 00
21 июня	+23° 27′	- 1′ 48″
15 июля	+21° 37′	- 5′ 30″
15 августа	+14° 15′	- 4′ 30″
15 сентября	+ 3° 17′	+ 4′ 30″
21 сентября	000	+ 7′ 30″
15 октября	- 8° 18′	+ 14′ 00″
15 ноября	-18° 20′	+ 15′ 30″
15 декабря	-23° 15′	+ 5′ 00″

Еще одна поправка вводится, чтобы перейти от времени, показываемого часами в конкретном пункте, к среднему солнечному времени в этом же пункте. Земной шар делится на временные пояса, в каждом из которых имеется центральная долгота, от которой ведется отсчет времени и на которой среднее солнечное время и время на часах совпадают. Для любой местности к востоку или западу от этой центральной долготы в пределах данного часового пояса в показаниях часов необходимо вводить поправку, равную 4 мин на 1° долготы (так как время полного оборота Земли вокруг оси (360°) составляет 24 часа). Если местность находится к западу от центральной долготы, эта величина должна прибавляться к времени на часах, чтобы получить местное среднее солнечное время, а если к востоку, то вычитываться. Если проводится перевод часов на летнее или зимнее время, то необходимо учитывать среднее солнечное время для центрального меридиана.

Определение полдня по истинному солнечному времени можно проиллюстрировать следующим примером.

Пример. Определить для заданных точек А и Б полдень по истинному солнечному времени.

Исходные данные. Заданы точки *А* и *Б* с координатами $\varphi = 50^0$ с.ш. и $\psi_A = 65^0$ и $\psi_Б = 70^0$ в.д.

Рассчитать время, которое должны показывать часы 15 января в полдень по истинному солнечному времени.

Решение.

Определяем часовой меридиан точек *А* и *Б*, т.е. долготу, от которой отсчитывается время в указанных точках.

$$\psi_0 = (\psi_{min} + \psi_{max})/2 = (60 + 75) / 2 = 67{,}5^{\circ}.$$

Определяем время, которое показывают часы, опережая среднее гринвичское время:

$$t_{zp} = \psi_0(4/60) = 67{,}5^{\circ}(4/60) = 4{,}5 \text{ ч}.$$

Местное среднее солнечное время отличается от времени, показываемого часами:

– для точки А:

$t = 4\,(\psi_0 - \psi_A) = 4\,(67{,}5^0 - 65^0) = 10$ мин.

– для точки Б:

$t = 4\,(\psi_0 - \psi_B) = 4\,(67{,}5^0 - 70^0) = 10$ мин.

Величина поправки, согласно табл. 2.1, для 15 января:

$$t_{попр} = -9 \text{ мин.}$$

Полдень по местному среднему солнечному времени наступает:

$t_{пд} = 12 + t = 12$ ч $+ 10$ мин $= 12$ ч 10 мин.

Полдень по истинному солнечному времени приходится (которое показывают часы):

– для точки А:

$t_{ист.солн} = t_{пд} + t_{попр} = 12$ ч 10 мин. $+ 9$ мин. $= 12$ ч 19 мин.

– для точки Б:

$t_{ист.солн.} = t_{пд} + t_{попр.} = 12$ ч 10 мин. $- 9$ мин. $= 12$ ч 01 мин.

Земля вращается вокруг Солнца за год. Направление земной оси остается фиксированным в пространстве под углом $\delta_0 = 23{,}5^\circ$ к нормали к плоскости вращения (рис. 5.9).

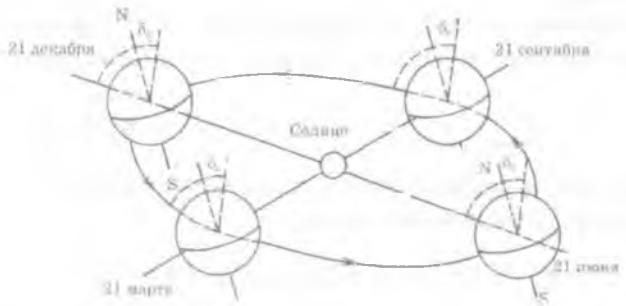


Рисунок 5.9. *Схема вращения Земли вокруг Солнца (сплошная линия на поверхности Земли – экватор)*

Видимое движение Солнца по небосводу обусловлено суточным вращением Земли вокруг своей оси (за 24 ч). Суточные изменения траектории движения от дня ко дню вызываются годичным вращением Земли вокруг Солнца (за 365 дней). Для многих целей проектирования необходимо учитывать положение Солнца на определенный день и час.

Ось Земли наклонена по отношению к плоскости эклиптики, которая проходит через Солнце и экватор, на 23,5°. Этот наклон обусловливает изменение количества приходящей радиации, продолжительности дня и смену сезонов. Если бы ось составляла с плоскостью эклиптики прямой угол, то на протяжении всего года на Земле наблюдались бы одинаковые условия.

Видимое движение Солнца по небосводу можно наблюдать ежедневно; оно проходит через зенит (высота 90°) в полдень на экваторе 21 сентября и 21 марта (дни равноденствий, т.е. когда продолжительность дня и ночи равны), 21 июня (летнее солнцестояние) – через тропик Рака (23,5° с.ш.), а 21 декабря (зимнее солнцестояние) – через тропик Козерога (23,5° ю.ш.). Это происходит также благодаря наклону оси вращения Земли на 23,5°.

Дни равноденствий существуют на всех широтах, и в эти дни Солнце встает точно на востоке и садится точно на западе. В северном полушарии продолжительность дня возрастает от декабря к июню и уменьшается от июня к декабрю, в южном – наоборот.

Угол склонения меняется с изменением даты, меняется и орбитальная скорость Земли, перемещающейся по эллипсу вокруг Солнца. Таким образом, часы, идущие равномерно, покажут время, несколько отличающееся от истинного солнечного времени, определенного, например, по солнечным часам.

Угол между направлением к Солнцу и экваториальной плоскостью называется склонением δ и является мерой сезонных изменений. Склонение есть широта точки, для которой Солнце находится в зените в полдень по сол-

нечному времени. Как следует из рис. 5.10, в северном полушарии плавно меняется от $\delta_0 = +23{,}5^\circ$ в период летнего солнцестояния до $\delta_0 = -23{,}5^\circ$ в период зимнего солнцестояния. Оно равно нулю в дни весеннего и осеннего равноденствий. Аналитически получено (формула Купера):

$$\delta = \delta_0 \sin [360^\circ (284 + n)/365], \qquad (5.9)$$

где n – день года (n=1 соответствует 1 января).

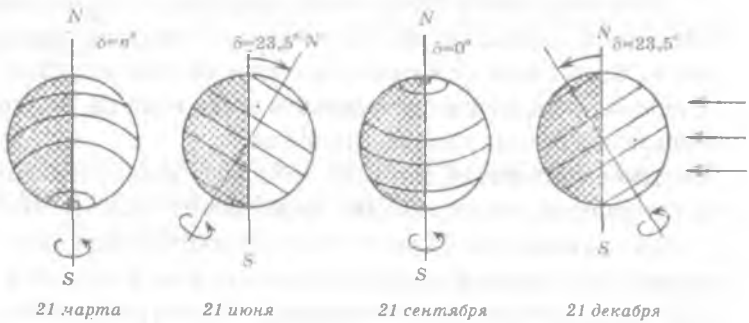


Рисунок 5.10. *Схема освещения поверхности Земли солнечным излучением в различные времена года*

Продолжительность дня между восходом и закатом Солнца определяется следующим образом:

$$Tc = (2|15)\cos^{-1}(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta) \qquad (5.10)$$

На широте 48°, например, Тс меняется от 16 ч в период летнего солнцестояния до 8 ч в период зимнего солнцестояния.

В полярных широтах ($|\varphi| > 66{,}5^\circ$) значение $|\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta|$ близко к единице. В этих случаях $Tc = 24$ ч (летом) или $Tc = 0$ (зимой), что видно на рис. 5.10.

Склонение Солнца, продолжительность светового дня Tc и время захода (восхода) Солнца можно также определить при помощи номограммы, приведенной на рис. 5.11.

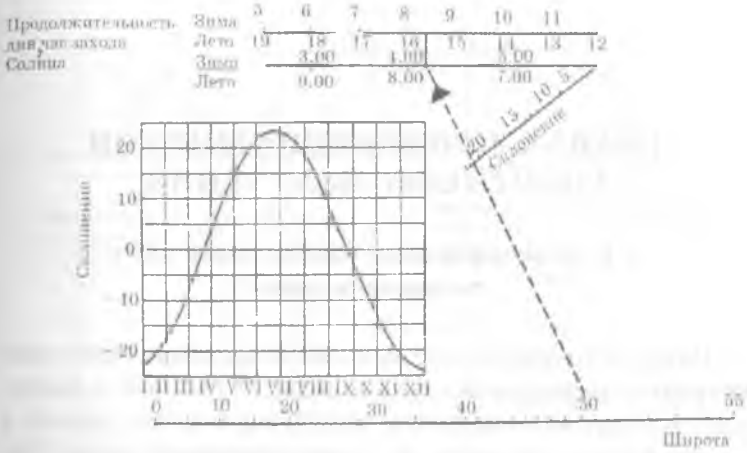


Рисунок 5.11. *Определение склонения Солнца, продолжительности светового дня Тс и время захода (восхода)*

ГЛАВА 6. ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

6.1. Классификация систем солнечного теплоснабжения

Наиболее очевидная область использования солнечной энергии – подогрев воздуха и воды. В районах с холодным климатом необходимо отопление жилых зданий и горячее водоснабжение. В промышленности также требуется большое количество горячей воды. В Австралии, например, на подогрев жидкостей до температур ниже 100° С расходуется почти 20% потребляемой энергии. В связи с этим в некоторых странах, особенно в Австралии, Израиле, США, Японии, активно расширяется производство солнечных нагревательных систем.

В этих странах широкое применение нашли системы солнечного теплоснабжения, используемые для отопления зданий и сооружений.

От выбора схемы потребления энергии, вырабатываемой солнечным коллектором, зависит экономическая целесообразность использования солнечной энергии. Известно значительное количество принципиальных схем использования солнечной энергии для теплоснабжения с применением различного рода теплоносителей. Схемы систем солнечного теплоснабжения приведены на рис. 6.1.

Согласно представленной схеме, все системы, которые нашли широкое применение на настоящий момент, можно по технологическому назначению разделить на системы отопления, системы горячего водоснабжения и комбинированные. Выбор технологического назначения гелиосистемы зависит в основном от климатических особенностей и географического расположения места установки системы.

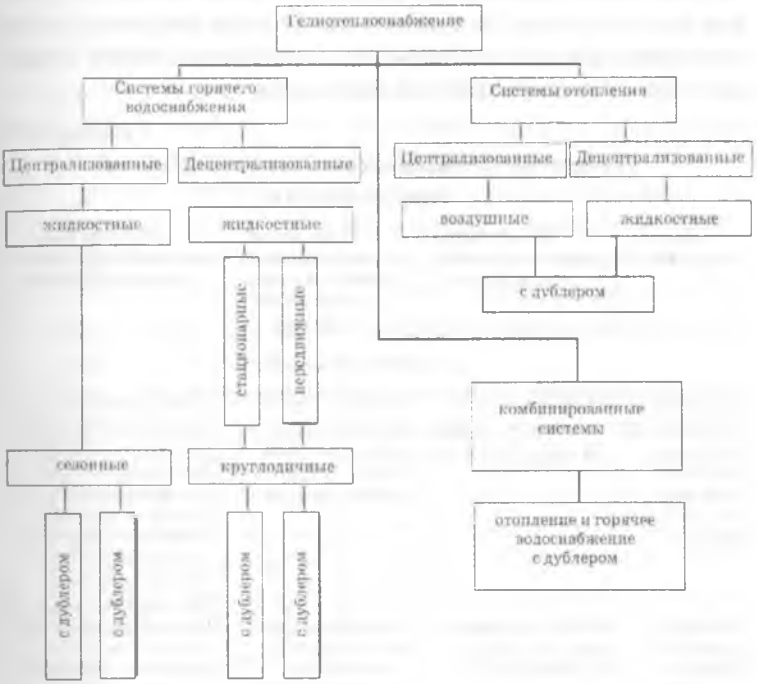


Рисунок 6.1. *Классификация систем солнечного теплоснабжения*

По виду теплоносителя эти системы можно разделить на жидкостные и воздушные, характеристики и схемы которых будут рассмотрены ниже.

Также при выборе систем солнечного теплоснабжения должны учитываться схемное решение систем, наличие дополнительного источника энергии.

Системы солнечного теплоснабжения можно также разделить на пассивные и активные. Характеристики и основные определяющие свойства таких систем солнечного теплоснабжения приведены в таблице 6.1.

Самыми простыми и дешевыми являются пассивные системы, которые не требуют дополнительного оборудования для сбора и распределения солнечной энергии. Принцип действия пассивных систем заключается в не-

посредственном обогреве помещения через светопрозрачные южные стены, а также в солнечном нагреве наружной поверхности ограждающих элементов зданий, защищенных слоем прозрачной изоляции.

Таблица 6.1

Характеристика активных и пассивных энергосистем

Тип гелиоздания	Тип системы солнечного энергоснабжения	Характеристика планировочных и технических мероприятий	Приемы организации солнечного энергоснабжения
Пассивные системы			
Здания традиционной конструкции (без специальных устройств)	Солнечные окна, оранжереи, фонари верхнего света	Ориентация основных помещений на южный фасад; широтновытянутый план	Планировочные мероприятия. Термоизоляция. Остекление термального массива большой площади. Вспомогательная энергетическая система. Естественная конвекция воздуха.
Здания с трансформированными конструктивными элементами	Стена-коллектор (аккумулятор), термопруды	Минимум северных фасадов, размещение вспомогательных помещений на северной стороне здания	Планировочные мероприятия. Термоизоляция. Массивные ограждения. Термальный массив. Вспомогательная энергетическая система. Естественная конвекция воздуха
Активные системы			
Здания со специальными устройствами в их структуре	Плоские коллекторы (водяные и воздушные) аккумуляторы	Компактность объема; размещение коллекторов на южном скате крыши или на южной стене	Наличие специальных аккумуляторов тепла: емкости с водой при водяном отоплении; емкости с гравием при воздушном отоплении
Здания с отдельно стоящими устройствами	Плоские коллекторы, концентраторы, аккумуляторы	Компактность объема. Дома обычного типа без ограничений, связанных с использованием солнечного отопления	Наличие бойлеров, специальной системы разводки тепла. Механическое побуждение при разводке тепла

Для преобразования солнечной энергии в тепловую применяют конструкции (гелиоприемники) со стеклянными или пластиковыми поверхностями, в которых используется явление парникового эффекта, т.е. свойство стекла задерживать тепловое инфракрасное излучение, повышая этим температуру внутри объема, ограждаемого стеклом. Однако применение только активных или пассивных систем не всегда целесообразно. В целях уменьшения теплопотерь и снижения энергетических потребностей здания целесообразно использование интегральных систем, считающих прогрессивные качества пассивных и активных систем.

В пассивных системах используется непосредственное нагревание строительных элементов за счет тепла, поступающего от прямой солнечной радиации, без применения технических средств. Пассивные отопительные системы рассчитаны на аккумулирование солнечного тепла в массивных конструкциях зданий естественным образом – через окна, обращенные на юг. Экономия энергии при этом на основе пассивной системы солнечного отопления составляет 25-30 %, а в перспективе это зависит от погодных условий.

К числу компонентов этих систем относятся: освещение помещений прямыми солнечными лучами: нагревание воды в резервуарах, расположенных в верхней части здания; использование трубопроводов, проложенных по наружным поверхностям стен, освещаемых солнцем; использование систем, в которых аккумуляторами тепловой энергии служат заполнения оконных проемов, жалюзийные устройства, наружные стены здания покрытия, а также термосифонные системы вентиляции для охлаждения воздуха в калориферах.

В пассивных системах коллекторами и аккумуляторами являются наружные ограждения зданий, которые обладают повышенной теплоемкостью.

Преобразование солнечной энергии в тепловую может быть осуществлено непосредственным обогревом солнечными лучами и накоплением тепла в массивном наруж-

ном ограждении, аккумулирующем это тепло и постепенно возвращающем его в помещение. К системам, использующим непосредственный обогрев помещений, относятся исторически возникшие традиционные типы солнцеприемников: солнечные окна, теплицы, оранжереи, фонари верхнего света.

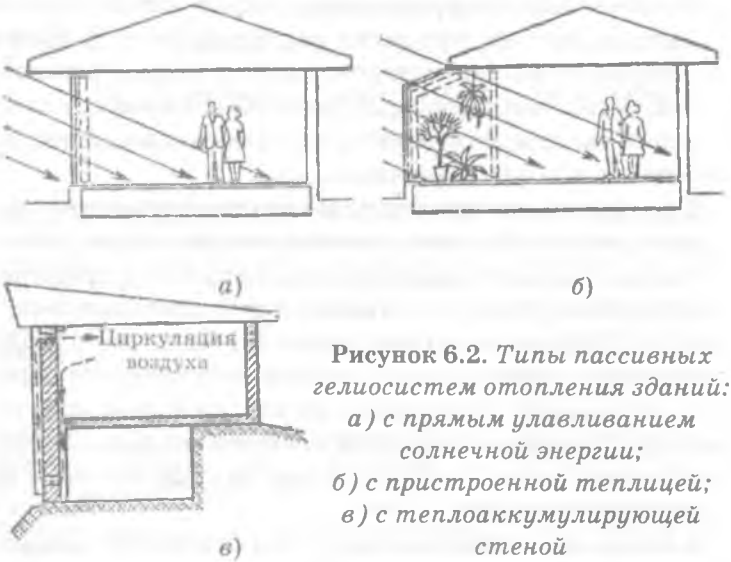


Рисунок 6.2. *Типы пассивных гелиосистем отопления зданий: а) с прямым улавливанием солнечной энергии; б) с пристроенной теплицей; в) с теплоаккумулирующей стеной*

Основными широко распространенными на практике методами пассивного солнечного отопления являются: прямое солнечное нагревание; метод остекленной массивной стены; метод присоединенного солнечного пространства.

Для примера на рисунках 6.2-6.4 приведены схемы солнечного дома, в котором использованы все перечисленные методы улавливания солнечного излучения.

Активные системы использования энергии Солнца, называемые энергоактивными, или гелиоконструкциями, совмещают с наружными ограждениями зданий. В активных солнечных системах теплоноситель перекачивается насосом.

Солнечный коллектор, включающий в свой состав теплоэлемент и теплоноситель, предназначен для непосред-

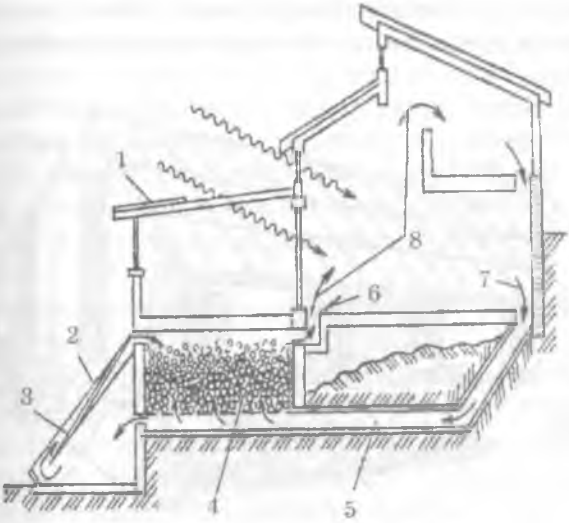


Рисунок 6.3. *Солнечный дом с прямым улавливанием солнечной энергии:*
1 – солнцезащитное устройство; 2 – воздушный коллектор; 3 – черный металлический лист; 4 – камни; 5 – возврат воздуха; 6 – регулирование потока воздуха; 7 – свежий воздух; 8 – теплый воздух

ственного восприятия солнечных лучей, а также передачи тепловой энергии в аккумулятор или потребителю.

Архитектура гелиоэнергетических зданий выражает существо гелиотехнических идей, заложенных в решения конструктивных элементов и соответственно определяющих формообразование объемно-пространственной структуры жилых и общественных зданий в соответствии с функциональным процессом, осуществляемым в здании.

Специфика определяется расположением и конструкцией гелиотехнических конструкций.

Использование солнечной энергии для энергоснабжения гражданских зданий вызывает значительные изменения его объемно-планировочной структуры и внешнего вида – «гелиоархитектуры». Следствием является изменение психологических и социальных установок в

отношении к естественным ресурсам земли, разумным способом их потребления и охраны окружающей природной среды.

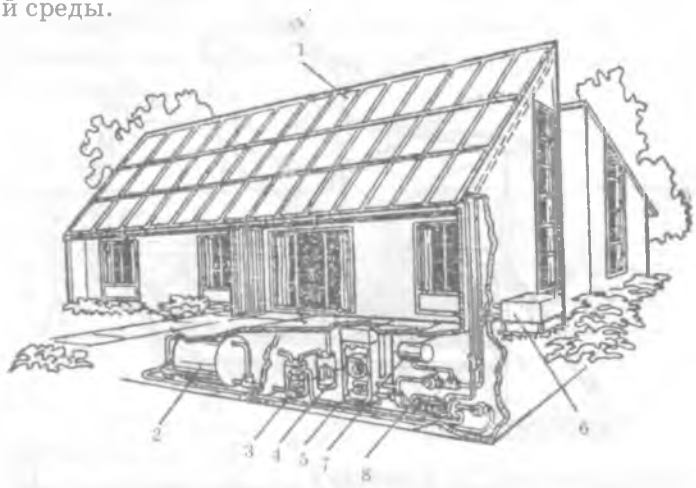


Рисунок 6.4. *Дом с активной гелиосистемой теплоснабжения:*
1 – солнечный коллектор; 2 – аккумулятор теплоты; 3 – теплообменник для подогрева воды; 4 – бак-аккумулятор для горячей воды; 5 – теплообменник для подогрева воздуха; 6 – теплообменник для сброса избыточной теплоты; 7 – расширительный бак; 8 – теплообменник для нагрева воды

Одним из важных требований к проектированию энергоактивных гелиозданий является учет факторов окружающей среды, воздействующих на здание, участвующих в формировании его внешнего объемно-пространственного решения.

Влияние общих требований на проектирование зданий по принципу взаимосвязи природного окружения и архитектуры энергоактивных зданий с учетом создания оптимальных экологических и микроклиматических условий обитания человека.

Тепловая характеристика здания зависит не только от аккумулируемых свойств его наружных ограждений, но

и от структурной формы размеров здания. Соответствующим формообразованием можно изменять количество поступления тепла в помещения через ограждения.

Несмотря на некоторое преимущество пассивных систем, использование солнечной энергии для теплоснабжения идет по пути применения активных, то есть систем со специально установленным оборудованием для сбора, хранения и распределения преобразованной солнечной энергии.

Активные системы солнечного теплоснабжения классифицируют:

- по назначению – горячего водоснабжения, отопления и комбинированные;
- по времени работы – сезонные и круглогодичные;
- по числу контуров – одно-, двух- и многоконтурные;
- по наличию и типу дублирующего контура.

Большая часть существующих систем солнечного теплоснабжения представляет собой жидкостные или воздушные системы.

Почти все системы солнечного теплоснабжения используют плоские солнечные коллекторы; аккумулятор тепла, емкость которого достаточна для обогрева здания в течение одного зимнего дня; дублирующий источник энергии, например, котел, работающий на обычном топливе.

Принципиальные схемы водяной (а) и воздушной (б) активных систем солнечного отопления приведены на рис. 6.5.

Аккумулятор – важный компонент системы солнечного теплоснабжения, так как главной особенностью солнечной радиации является периодичность ее поступления и несовпадение максимумов нагрузки теплопотребления. Аккумуляторы, как правило, работают за счет теплоемкости рабочего вещества (воды или воздуха). Они просты, надежны и относительно дешевы. Водяной аккумулятор представляет собой стальной цилиндрический резервуар со слоем теплоизоляции. В воздушных аккумуляторах применяют для засыпки резервуара гальку или другой наполнитель.

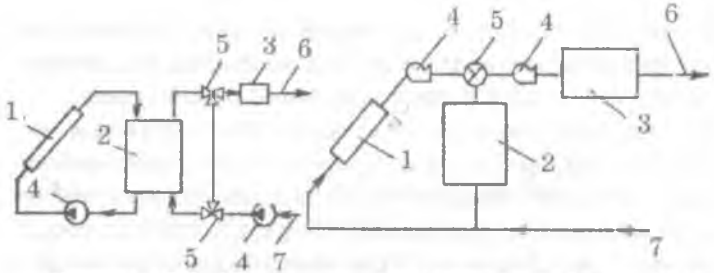


Рисунок 6.5. *Принципиальные схемы водяной (а) и воздушной (б) активных систем солнечного отопления: 1 – коллектор солнечной энергии; 2 – аккумулятор теплоты; 3 – дополнительный источник энергии; 4 – насос (вентилятор); 5 – регулирующий клапан; 6 – подача нагретого теплоносителя; 7 – возврат охлажденного теплоносителя*

Назначение дублирующего источника теплоты – полное обеспечение объекта теплом в случае недостатка или отсутствия солнечной радиации. Выбор источника зависит от местных условий: им может быть тэн или во-догрейный котел на органическом топливе.

По экономическим соображениям за счет солнечной энергии целесообразно покрывать до 80% нагрузки горячего водоснабжения, поэтому необходимо использовать, наряду с коллектором солнечной энергии, также и дополнительный источник энергии. Различают несколько схем подвода энергии от ДИЭ, которые приведены на рис. 6.6:

1) непосредственно в бак-аккумулятор;

2) к линии горячей воды на выходе из бака-аккумулятора;

3) к линии холодной воды на запасной линии.

Наиболее эффективно подключение ДИЭ по второй схеме.

В жидкостных системах в качестве теплоносителя используется жидкость (вода или антифриз), а в качестве аккумулирующей среды – вода. Преобразование падающей солнечной радиации в тепловую энергию осуществляется в плоских солнечных коллекторах. Эта энергия аккумулируется в баке-аккумуляторе за счет теплоемкости жидко-

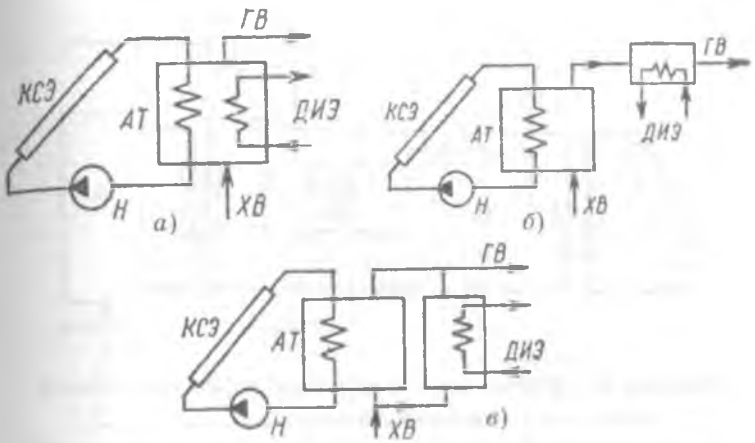


Рисунок 6.6. *Схемы включения дублирующего источника энергии в систему солнечного теплоснабжения: а) непосредственно в бак-аккумулятор; б) к горячей воде на выходе из бака-аккумулятора; в) к линии холодной воды*

сти и используется по мере необходимости для обеспечения тепловой нагрузки отопления и горячего водоснабжения.

Для передачи тепла от аккумулятора в здание используется водо-воздушный или водо-водяной теплообменник, а от аккумулятора в систему горячего водоснабжения дома – дополнительный водо-водяной теплообменник. Система горячего водоснабжения включает бак предварительного нагрева, в котором вода подогревается за счет солнечного тепла и подается затем в обычные водонагреватели. В качестве дублирующего источника энергии используют обычный котел, который обеспечивает отопление в тех случаях, когда запас энергии в баке-аккумуляторе истощается. В комплект оборудования системы солнечного теплоснабжения входят регуляторы, предохранительные клапаны, насосы и трубопроводы. В таблице 6.7 приведены рекомендации при проектировании жидкостных систем солнечного теплоснабжения.

На рис. 6.7 приведена схема жидкостной системы солнечного тепло-снабжения.

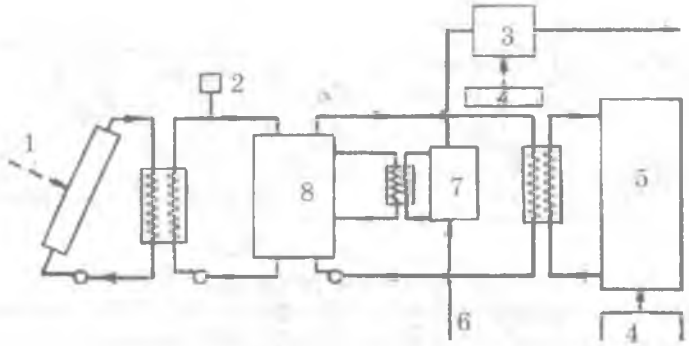


Рисунок 6.7. *Схема жидкостной системы солнечного теплоснабжения:*
1 – солнечная радиация; 2 – предохранительный клапан; 3 – бак горячей воды; 4 – источник дополнительной энергии; 5 – здание; 6 – подача холодной воды; 7 – бак предварительного подогрева воды; 8 – бак-аккумулятор

Таблица 6.2

Рекомендации по проектированию жидкостных систем солнечного теплоснабжения

Характеристика системы	Рекомендуемое численное значение
Расход жидкости через коллектор (50% раствор этиленгликоля в воде)	0,015 л/(м^2 с)
Наклон коллектора к горизонту и ориентация	Оптимальны: южная ориентация и угол наклона, равный широте местности плюс 10; отклонение до 15^0 оказывает слабое влияние
Поправочный коэффициент, учитывающий влияние теплообменника	$F_R' / F_R \geq 0,9$
Вместимость основного бака-аккумулятора	50-100 л/ м^2
Теплообменник системы отопления	$1 \leq \varepsilon_r C_{min}/UA \leq 5$
Вместимость бака предварительного подогрева воды	В 1,5-2 раза больше вместимости стандартного водонагревателя

В воздушных системах в качестве теплоносителя используется воздух. На рис. 6.8 приведена схема воздушной системы солнечного теплоснабжения.

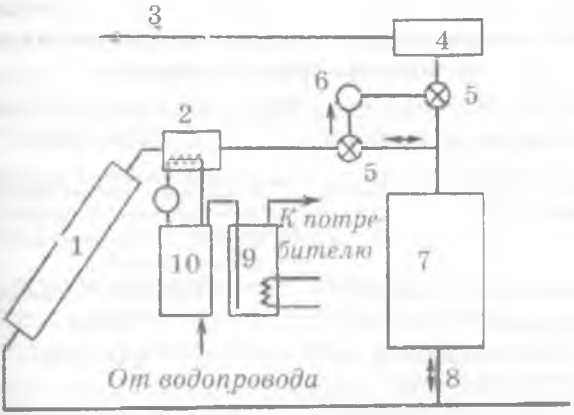


Рисунок 6.8. *Схема воздушной системы солнечного теплоснабжения:*
1 – коллектор; 2 – теплообменник; 3 – поток теплого воздуха в здание; 4 – источник дополнительной энергии; 5 – заслонка; 6 – вентилятор; 7 – галечный аккумулятор; 8 – подача рециркуляционного воздуха; 9 – водонагреватель; 10 – бак предварительного подогрева воды

Воздух нагревается в плоском коллекторе солнечной энергии и подается либо в помещение, либо в галечный аккумулятор. Энергия аккумулируется в слоевой насадке, которая нагревается циркуляционным горячим воздухом. Ночью или в пасмурную погоду, когда приход солнечной радиации недостаточен для обеспечения тепловой нагрузки, воздух проходит через нагретую гальку в аккумуляторе и затем поступает в помещение. При истощении запаса тепла в аккумуляторе воздух дополнительно подогревается в котле. Энергия, необходимая для нагрева воды на бытовые нужды, как и в жидкостных системах, подводится путем теплообмена между нагретым в коллекторе воздухом и водой из бака предварительного подогрева. При необходимости эта вода дополнительно подогревается обычным водонагревателем.

Таблица 6.3

Рекомендации по проектированию воздушных систем солнечного теплоснабжения

Характеристика системы	Рекомендуемое численное значение
Расход воздуха через коллектор	0,015 л /($м^2$ с)
Наклон коллектора к горизонту и ориентация	Оптимальны: южная ориентация и угол наклона, равный широте местности плюс 10 ; отклонение до15 оказывает слабое влияние
Вместимость аккумулятора	0,15-0,35 $м^3$ гальки $м^2$
Размер гальки	1-3 см
Высота аккумулятора в направлении потока воздуха	1,25-2,5 м
Вместимость бака предварительного подогрева воды	В 1,5-2 раза больше вместимости стандартного водонагревателя
ПЕРЕПАДЫ ДАВЛЕНИЯ: – в аккумуляторе – в коллекторе – в воздухопроводах	 25-75 Па 50-200 Па 10 Па на 15 м
Изоляция воздухопроводов	Слой стекловолокна толщиной 2,5 мм
Утечки	Соединения каналов должны быть уплотнены

По принципу работы солнечные водонагревательные установки можно разделить на два типа:

а) установки с естественной циркуляцией теплоносителя;

б) установки с принудительной циркуляцией теплоносителя.

Водонагреватели с естественной циркуляцией теплоносителя. Принцип работы солнечной водонагревательной установки термосифонного типа с естественной циркуляцией теплоносителя иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 6.9. Установка содержит коллектор солнечной энергии, бак-аккумулятор горячей воды, подъемную трубу и опускную трубу. В нижнюю часть бака-аккумулятора подводится холодная вода, и из его верхней части отводится к потребителям горячая вода. Перечисленные элементы образуют контур естественной циркуляции воды. По подъемной трубе горячая вода из КСЭ поступает в бак-аккумулятор, а по опускной трубе из бака

в коллектор поступает более холодная вода для нагрева за счет поглощенной солнечной энергии. Поскольку средняя температура воды в подъемной трубе выше, чем в опускной, плотность воды, напротив, ниже во второй трубе. И вследствие этого возникает разность давлений, вызывающая движение воды в контуре циркуляции:

$$\Delta p = g\,H\,(\rho_1 - \rho_2),$$

где g – ускорение свободного падения; H – разность отметок низа солнечного коллектора (нулевой уровень) и места подвода горячей воды в бак-аккумулятор, м; ρ_1 – плотность воды в опускной трубе при температуре T_1, кг/м^3; ρ_2 – плотность воды в подъемной трубе при температуре T_2, кг/ м^3.

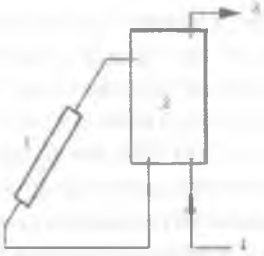


Рисунок 6.9. *Одноконтурная система гелиотеплоснабжения с естественной циркуляцией: 1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор забора горячей воды; 3 – забор горячей воды; 4 – подача холодной воды*

Очевидно, что чем больше разность температур воды, тем больше разность давлений и интенсивней движение воды. Аналогичное влияние оказывает увеличение разности отметок Н.

Непременным условием эффективной работы солнечной водонагревательной установки термосифонного типа является тепловая изоляция всех нагретых поверхностей. Толщина тепловой изоляции бака должна быть 50-75 мм при использовании минеральной ваты или дру-

гого материала с коэффициентом теплопроводности 0,04-0,045 Вт/м^3, а для трубопроводов от 25 до 50 мм точка присоединения подъемной трубы к баку-аккумулятору должна находиться в верхней части бака на расстоянии не менее 2/3 высоты бака от его днища, а патрубок для подпитки холодной воды следует присоединять к нижней части бака. При необходимости использования электронагревателя для подогрева воды внутри бака-аккумулятора его необходимо располагать горизонтально и размещать в верхней части бака. При соблюдении указанных условий обеспечивается температурное расслоение (стратификация) жидкости по высоте бака.

Более высокое положение бака-аккумулятора относительно коллектора солнечной энергии в водонагревательных установках термосифонного типа имеет важное значение не только для обеспечения циркуляции теплоносителя в дневное время, но также и для предотвращения циркуляции воды в обратном направлении в ночное время. Для предотвращения этого нижний край бака-аккумулятора должен быть на 300-600 мм выше верхней отметки наклонного коллектора солнечной энергии.

Водонагреватели с принудительной циркуляцией теплоносителя. Установки с принудительной циркуляцией теплоносителя используются для горячего водоснабжения крупных объектов. В них солнечный коллектор представляет собой большой массив модулей КСЭ. Эти установки имеют большую производительность, но довольно сложны по конструкции. Отличительная особенность – наличие насосов и смешивающих клапанов.

В последние годы все больше производится пассивных водонагревателей, которые работают без насоса, и, следовательно, не потребляют электроэнергию. Они проще в конструктивном отношении, надежнее в эксплуатации, почти не требуют ухода, а по своей эффективности практически не уступают солнечным установкам с принудительной циркуляцией. Более половины пассивных водонагревателей составляют установки термосифонного типа с естественной циркуляцией.

На рисунках 6,10-6,11 представлены примеры некоторых систем солнечного тепловодоснабжения.

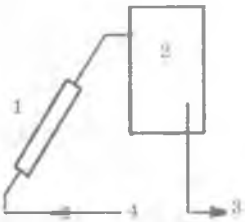


Рисунок 6.10. *Одноконтурная проточная система гелиотеплоснабжения:*
1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – забор горячей воды; 4– подача холодной воды

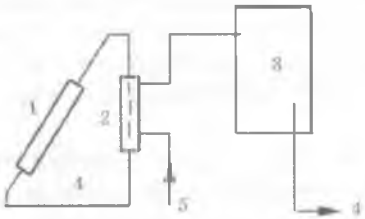


Рисунок 6.11. *Простейшая двухконтурная система гелиотеплоснабжения с естественной циркуляцией:*
1 – солнечный коллектор; 2 – теплообменник;
3 – бак-аккумулятор; 4 – забор горячей воды; 5 – подача холодной воды

Недостаток двухконтурных термосифонных систем – низкая тепловая эффективность, вызванная малой скоростью движения теплоносителя. Для ее повышения используют принудительную циркуляцию.

В активных системах солнечного отопления тепло передается от коллектора к аккумулятору и затем в помещение.

В зависимости от сезонности использования применяют водонагреватели, выполненные по одно- или двухконтурной схеме (см. рис. 6.12).

Для теплых периодов применяются в основном водонагреватели, выполненные по одноконтурной схеме, ког-

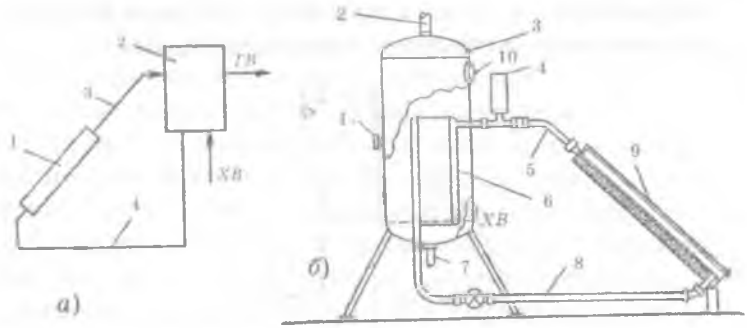


Рисунок 6.12. *Схема (а) и конструкция (б) солнечного водонагревателя с естественной циркуляцией: а) 1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор горячей воды; б) 1 – термостат; 2 – горячая вода; 3 – бак горячей воды; 4 – расширительный бак; 5 – горячий теплоноситель; 6 – теплообменник; 7 – подвод холодной воды; 8 – обратная труба; 9 – коллектор; 10 – электронагреватель*

да один и тот же теплоноситель циркулирует через единый контур, состоящий из коллектора солнечной энергии, бака-аккумулятора и потребителя.

В холодном климате, т.е. для круглогодичного использования, применяются двухконтурные схемы водонагревательных установок. В первом контуре, состоящем из коллектора солнечной энергии и теплообменника с циркуляционным насосом и расширительным баком, используется незамерзающий теплоноситель. Второй контур образуют бак-аккумулятор, теплообменник и электрический или газовый котел. Холодная вода подводится в нижнюю часть бака-аккумулятора, а вода, нагретая в теплообменнике, поступает в верхнюю часть бака, а оттуда через автоматический смесительный клапан подается к потребителю. Все оборудование размещается внутри здания, за исключением коллектора солнечной энергии. Газовый или электрический котел предназначен для доведения температуры горячей воды, предварительно нагретой за счет солнечной энергии до требуемого значения. При от-

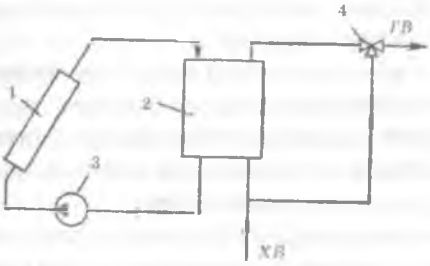


Рисунок 6.13. *Солнечная водонагревательная установка с принудительной циркуляцией:*
1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор;
3 – насос; 4 – клапан; ХВ и ГВ – холодная и горячая вода

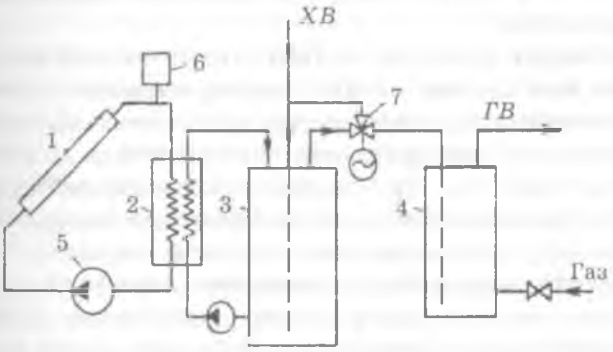


Рисунок 6.14. *Двухконтурная схема солнечной водонагревательной установки:*
1 – солнечный коллектор; 2 – теплообменник;
3 – аккумулятор горячей воды; 4 – дублер (газовый котел); 5 – насос; 6 – расширительный бак;
7 – автоматический смесительный клапан;
ХВ и ГВ – холодная и горячая вода

сутствии солнечной радиации или недостаточном ее поступлении вся тепловая нагрузка горячего водоснабжения обеспечивается этим источником энергии.

Солнечные водонагреватели могут использоваться в качестве первой ступени для предварительного подогре-

ва воды в обычных топливных системах горячего водоснабжения жилого здания.

Для достижения высокой эффективности системы горячего водоснабжения следует избегать смешения горячей и холодной жидкости в баке-аккумуляторе, для чего в нем необходимо поддерживать температурное расслоение (стратификацию) жидкости.

В качестве рекомендаций относительно схемного решения комбинированных солнечно-топливных установок горячего водоснабжения можно предложить следующее:

1. Необходимо обеспечивать улавливание максимально возможного количества солнечной энергии, что достигается снижением среднего уровня температуры теплоносителя в коллекторе и использованием эффективного коллектора.

2. Следует исходить из того, что солнечная энергия должна использоваться для предварительного подогрева теплоносителя, в то время как дополнительный источник энергии – для доведения теплоносителя до требуемой температуры. При таком подходе обеспечивается максимальная экономия топлива благодаря наиболее эффективному использованию солнечной энергии.

3. Необходимо избегать смешения сред с различными уровнями температуры в аккумуляторе теплоты. Оптимальным решением является использование двух баков: одного – с низкой температурой теплоносителя, обеспечиваемого солнечным нагревом, а второго – с высокой температурой за счет дополнительного источника энергии.

Проведенный анализ схемных решений систем солнечного теплоснабжения и горячего водоснабжения, распределения среднемесячных температур наружного воздуха по регионам Республики Казахстан показал следующее:

1. Для сезонных гелиоустановок (для эксплуатации в основном в летнее время) необходимо применять одноконтурные схемы. Такие установки могут функционировать во всех регионах Республики Казахстан, например, для отгонного животноводства, для снабжения горячей водой отдельно стоящих объектов и жилых домов и т.д.

2. Двухконтурные гелиоустановки необходимо применять для круглогодичного использования в северном и восточном регионах.

3. Для круглогодичного использования в южном и западном регионах вполне достаточным является применение одноконтурных гелиосистем с соответствующим аккумулятором тепловой энергии.

6.2. Солнечные системы для получения электроэнергии

Концентрация солнечной энергии позволяет получать температуры, равные или выше 700°С, достаточно высокие для работы теплового двигателя с приемлемым коэффициентом полезного действия. Для этого необходимо использование концентрирующих коллекторов солнечной энергии. Необходимо отметить, что изготовление параболических концентраторов с диаметром, превышающим 30 м, довольно сложно.

Солнечные электростанции можно выполнить по двум вариантам:

- использование большого количества рассредоточенных параболических коллекторов;
- система большого количества гелиостатов и центральной солнечной башни.

На рис. 6.15 показана система, состоящая из множества небольших концентрирующих коллекторов, каждый из которых независимо следит за Солнцем. Концентраторы не обязательно должны иметь форму параболоидов, но она наиболее предпочтительна.

Каждый коллектор передает солнечную энергию жидкости-теплоносителю, горячая жидкость от всех коллекторов собирается в центральной энергостанции. Теплонесущая жидкость может быть водяным паром, если она будет прямо использована в паровой турбине или какой-либо термохимической средой – такой, как, например, диссоциированный аммиак. Схема устройства, основанного на диссоциации и синтезе аммиака, показана на рис. 6.16.

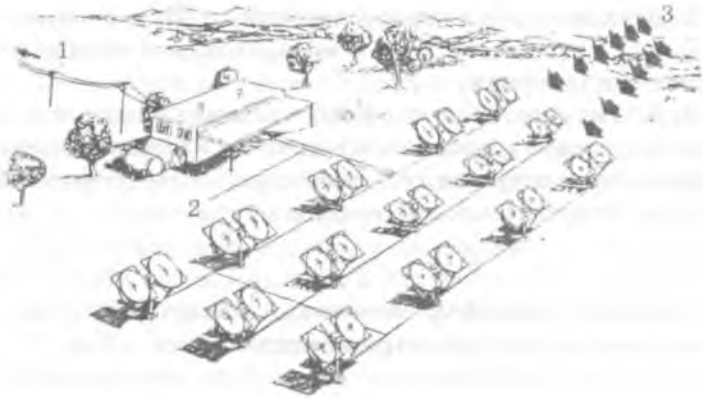


Рисунок 6.15. *Схема получения электроэнергии от системы распределенных коллекторов:*
1 – электроэнергия; 2 – трубы под землей, по которым протекает аммиак или пар; 3 – солнечные лучи

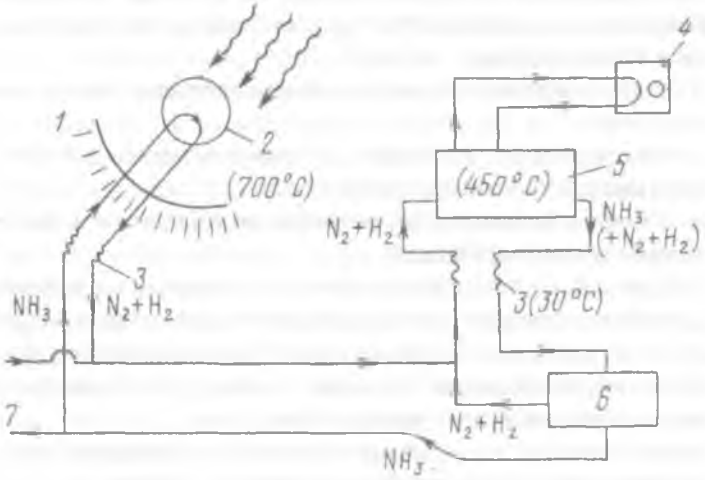


Рисунок 6.16. *Диссоциация и синтез аммиака как накопителя солнечной энергии:*
1 – зеркало; 2 – приемник, 3 – теплообменник;
4 – тепловой двигатель; 5 – камера синтеза;
6 – сепаратор; 7– к другим зеркалам

Преимуществом последней системы является то, что в случае использования химического реагента отсутствуют потери между коллектором и тепловым двигателем, так, что тепло может передаваться на большие расстояния или в течение длительного времени (например, с вечера и в течение всей ночи, что позволяет осуществить непрерывную генерацию электроэнергии). В этой системе солнечные лучи фокусируются на приемнике, в котором газообразный аммиак при высоком давлении (около 30 МПа) диссоциирует на водород и азот. Эта реакция – эндотермическая, дефект энергии составляет $\Delta H = -46$ кДж/моль NH_3; солнечное излучение снабжает систему энергией, необходимой для протекания этой реакции. В присутствии катализатора в камере синтеза N_2 и H_2 частично рекомбинируют, выделяемое при этом тепло можно использовать для подключения внешнего теплового двигателя или другого устройства. Выходящий из камеры синтеза поток охлаждается, что приводит к сжижению аммиака.

Альтернативный вариант состоит в использовании расположенных на большой площади, следящих за Солнцем плоских зеркал, отражающих солнечные лучи на центральный приемник, помещенный на вершине башни, так называемые солнечные электростанции башенного типа.

Система с центральным коллектором состоит из большого числа управляемых зеркал-гелиостатов, которые отражают солнечную радиацию и направляют ее на центральный приемник, помещенный на высокой башне. При высокой степени концентрации солнечной радиации в приемнике может быть получен пар высокой температуры. Кроме воды можно использовать также и другие теплоносители (например, газообразные или жидкометаллические). В качестве рабочего тела в тепловом двигателе обычно используют:

- водяной пар с температурой до 550 °С;
- воздух и другие газы – до 1000 °С;
- низкокипящие жидкости (в том числе фреоны) – до 100 °С;
- жидкометаллические – до 800 °С.

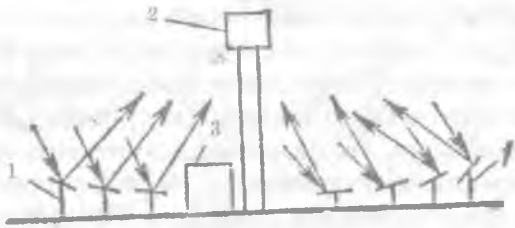


Рисунок 6.17. *Схема солнечной электростанции башенного типа:*
1 – гелиостаты; 2 – центральный приемник излучения; 3 – оборудование станции

Например, опытная солнечная станция мощностью 50 кВт, построенная в Италии, может генерировать 150 кг/ч перегретого пара при температуре 500 °С. Поле гелиостатов этой станции состоит из 270 зеркал диаметром 1 м каждое. Рассматриваются станции мощностью от 2 МВт до 100 МВт с высотой башни до 300-450 м. При строительстве солнечных станций необходимо ориентироваться на гелиостаты большой площади, так как в этом случае меньше вероятность повреждения их сильными ветрами.

В 1985 г. в п. Щелкино в Крыму была введена в эксплуатацию первая в СССР солнечная электростанция СЭС-5, электрической мощностью 5 МВт с 1600 гелиостатами (плоских зеркал) площадью 25,5 м^2 каждый, имеющими коэффициент отражения 0,71. Они концентрируют солнечную энергию на центральный приемник в виде открытого цилиндра, установленного на башне высотой 89 м и служащего парогенератором.

В настоящее время СЭС мощностью до 10 МВт нерентабельны. Оптимальной является СЭС мощностью 100 МВт при высоте башни 250 м. Управление такими станциями и ориентацией гелиостатов осуществляется с помощью ЭВМ. Крупные СЭС обычно состоят из отдельных блоков мощностью от 30 до 100 МВт.

Большим недостатком СЭС башенного типа является их высокая стоимость и большая занимаемая площадь.

Для размещения солнечных электростанций лучше всего подходят засушливые или пустынные зоны. Так, районы, в которых годовое количество осадков не превышает 250 мм, занимают около 1/8 части всей суши Земли. На поверхность самых больших пустынь мира общей площадью 20 млн. км^2 (площадь Сахары 7 млн. км^2) за год поступает около $5 \cdot 10^{16}$ кВт-ч солнечной энергии. При эффективном преобразовании солнечной энергии в электрическую, равной 10%, достаточно использовать всего 1% территории пустынных зон для размещения СЭС, чтобы обеспечить современный мировой уровень энергопотребления.

ГЛАВА 7. КОЛЛЕКТОРЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

7.1. Виды КСЭ и их конструкция

Основным элементом солнечной системы является приемник, в котором происходит поглощение солнечного излучения и передача энергии жидкости. Плоский коллектор солнечной энергии (КСЭ) работает по принципу «черного ящика». Большая часть солнечной радиации, падающей на коллектор, поглощается его поверхностью, которая является «черной» по отношению к солнечному излучению. Часть поглощенной энергии передается жидкости, циркулирующей через коллектор, а остальная теряется в результате теплообмена с окружающей средой. Тепло, уносимое жидкостью, представляет собой полезное тепло, которое либо аккумулируется, либо используется для покрытия отопительной нагрузки.

Основные элементы КСЭ следующие:

– поглощающая пластина, обычно из металла, с неотражающим черным покрытием, обеспечивающим максимальное поглощение солнечного излучения;

– трубы или каналы, по которым циркулирует жидкость или воздух, находящиеся в тепловом контакте с поглощающей пластиной;

– тепловая изоляция днища и боковых кромок пластины;

– один или несколько воздушных промежутков, разделенных прозрачными покрытиями в целях теплоизоляции пластины сверху;

– корпус, обеспечивающий долговечность и устойчивость к воздействию погодных факторов.

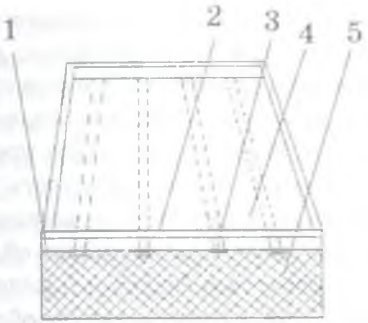


Рисунок 7.1. *Конструкция плоского солнечного коллектора:*
1 – корпус; 2 – прозрачное покрытие; 3 – труба коллектора; 4 – поглощающая пластина; 5 – изоляция

Плоские приемники собирают как прямое, так и рассеянное излучение и поэтому могут работать также и в облачную погоду. В связи с этим, а также с учетом относительно невысокой стоимости (см. табл. 7.1) плоские приемники более предпочтительны при нагревании жидкостей до температур ниже 100 °С.

Таблица 7.1

Характеристики приемников солнечного излучения

Поверхность	Количество стеклянных покрытий	Цена дол. • м$^{-2}$
Черная	Нет	20
	Один слой	50-200
	Два слоя	300
Селективная	Один слой	300
	Два слоя	400
	Вакуумированная трубка	500

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

Прозрачное покрытие обычно делают из стекла. Стекло обладает превосходной стойкостью к атмосферным воздействиям и хорошими механическими свойствами. Оно относительно недорого и при низком содержании окиси железа может иметь высокую прозрачность. Недостатками стекла являются хрупкость и большая масса. Наряду со стеклом возможно применение и пластмассовых материалов. Пластмасса обычно обладает меньшей хрупкостью и ломкостью, легка и в виде тонких листов недорога. Однако она, как правило, не обладает столь высокой устойчивостью к воздействию погодных факторов, присущей стеклу. На поверхность пластмассового листа легко наносятся царапины, и многие пластмассы со временем деградируют и желтеют, в результате чего снижается их пропускательная способность по отношению к солнечному излучению и ухудшается механическая прочность. Еще одним преимуществом стекла по сравнению с пластмассами является то, что стекло поглощает или отражает все падающее на него длинноволновое (тепловое) излучение, испускаемое поглощающей пластиной. Потери тепла в окружающую среду путем излучения снижаются при этом более эффективно, чем в случае с пластмассовым покрытием, которое пропускает часть длинноволнового излучения.

Плоский коллектор обычно устанавливают неподвижно на здании. Его ориентация зависит от местоположения и времени года, в течение которого должна работать солнечная энергетическая установка.

Плоский коллектор обеспечивает низкопотенциальное тепло, требуемое для нагрева воды и отопления помещения.

Фокусирующие (концентрирующие) солнечные коллекторы, в том числе с параболическим концентратором или концентратором Френеля, могут применяться в системах солнечного теплоснабжения. Большая часть фокусирующих коллекторов использует только прямую солнечную радиацию. Преимущество фокусирующего коллектора по сравнению с плоским состоит в том, что он

имеет меньшую площадь поверхности, с которой тепло уходит в окружающую среду, а следовательно, рабочая жидкость может быть нагрета в нем до более высоких температур, чем в плоских коллекторах. Однако для нужд отопления и горячего водоснабжения более высокая температура почти или совсем не имеет значения. Для большинства концентрирующих систем коллектор должен следить за положением солнца. Системы, не дающие изображения солнца, обычно требуют регулировки несколько раз в год.

В большинстве применяемых на практике солнечных энергетических установок степень концентрации солнечного излучения, т.е. отношение плотности лучистого потока на поверхности приемника к плотности потока прямой солнечной радиации, должна составлять около 10 или более, чтобы достигнуть высоких температур. Это можно сделать с помощью различных следящих систем, но было бы значительно выгоднее, если бы требуемая степень концентрации достигалась неподвижным коллектором. Интересная разновидность концентратора, первоначально названного идеальным цилиндрическим световым коллектором, была предложена в 1974 г. Уинстоном. Эта разработка основывалась на экспериментальных наблюдениях излучения.

На рис. 7.2 показано поперечное сечение конструкции, известной под названием составной параболический концентратор. Степень концентрации вплоть до 10 может быть достигнута без суточного слежения, если же допустимы меньшие значения степени концентрации, примерно 3, то может не потребоваться даже сезонная корректировка. Как показано на рис. 7.2, фокус правой параболы лежит на основании левой параболы и наоборот. Ось каждой параболы наклонена к вертикальной оптической оси. Собирание тепла может осуществляться с помощью цилиндрических коллекторов, обладающих свойствами абсолютно черного тела и расположенных на основании параболической конструкции. Подобные конструкции также носят название фоклины или же фоконы.

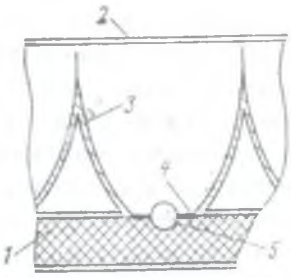


Рисунок 7.2. *Концентрирующий параболический коллектор:*
1 – изоляция; 2 – стеклянное покрытие; 3 – парабола; 4 – фокус параболы; 5 – труба коллектора

Преобразование составного параболического концентратора в односторонний параболический профиль, заканчивающийся круговым отражателем, было описано Раблом и называется спиральным или «ракушечным» коллектором. Как показано на рис. 7.3, спиральный коллектор состоит из изогнутых по спирали профилей. Попадая в спираль, прямая радиация не может выйти за ее пределы, а продолжает отражаться в глубь спирали, пока не достигнет поглощающего элемента, изображенного на рис. 7.3, в виде круглой трубы.

Для солнечных термоэлектрогенераторов Смит предложил создать параболический входной участок, переходящий в спираль, и вакуумированный промежуток вокруг коллектора. Заявка на изобретение отражателя, профиль которого рассчитан таким образом, что все излучение – диффузное или зеркальное, которое попадает в устройство через входное сечение, должно в конце концов попасть на поглощающий элемент конструкции и не может быть отражено наружу, было зарегистрировано в Австралии, а один из участников конкурса по солнечному отоплению, проводившегося в 1975 г. Ассоциацией развития медной промышленности в Великобритании, разработал логарифмическую, или равноугольную, спиральную систему.

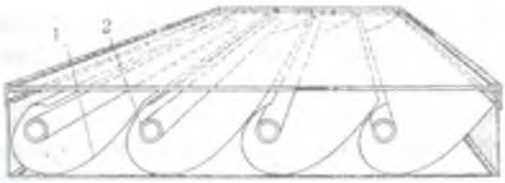


Рисунок 7.3. *Солнечный коллектор с отражателем, изогнутым по спирали:*
1 – отражающая поверхность; 2 – труба коллектора

Небольшая степень концентрации солнечной энергии может быть достигнута за счет того, что излучение, падающее на некоторую поверхность, отражается от нее на площадь меньших размеров. Поскольку фокусирование не требуется, то можно использовать как прямую, так и диффузную радиацию. Простой, легкий в изготовлении коллектор этого типа состоит из ряда параллельных трапецеидальных неподвижных желобов, как показано на рис. 7.4, и носит название трапецеидального коллектора с небольшой степенью концентрации.

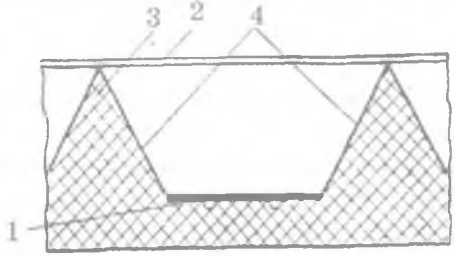


Рисунок 7.4. *Трапецеидальный солнечный коллектор:*
1 – поглощающая пластина коллектора; 2 – прозрачное покрытие; 3 – отражающая поверхность; 4 – изоляция

Боковые стенки желобков имеют высокую отражательную способность, а их основания являются поглощающей поверхностью коллектора. Поскольку площадь поглощающей поверхности меньше общей площади коллектора, то потери тепла уменьшаются. Для описания этого эффекта можно использовать понятие направлен-

ной селективности, что было продемонстрировано Холландсом для желобков *V*-образной конфигурации. Этот тип коллектора может найти широкое применение в установках абсорбционного охлаждения, поскольку возможность получения полезной энергии с помощью плоских коллекторов ограничена температурами 100-150 °С.

Коллектор, который показан на рис. 7.5 (SRTA), представляет собой сферический отражатель, расположенный неподвижно и обращенный к солнцу. Он имеет линейный приемник, который может следить за положением солнца благодаря простому вращательному движению вокруг центра кривизны отражателя. Опыт работы показал, что применение подобных установок мощностью от 10 до 100 МВт в промышленном масштабе позволило бы вырабатывать более дешевую электроэнергию, чем на АЭС. К достоинствам применения SRTA в быту относится то, что такая система может быть использована как для получения электроэнергии, так и для горячего водоснабжения. Кроме того, рабочая жидкость может быть нагрета до высокой температуры, что позволяет уменьшить объем аккумулирующей системы. Наконец, отсутствует опасность разрушения больших застекленных поверхностей. Основным недостатком установки является то, что она может использовать только прямую радиацию. В странах с высокой долей прямой радиации SRTA может широко применяться для энергообеспечения различных мелких потребителей.



Рисунок 7.5. *Солнечный коллектор с неподвижным отражателем и следящим приемником*

На рис. 7.6. приведены примеры других часто встречающихся коллекторов и концентраторов солнечной энергии.

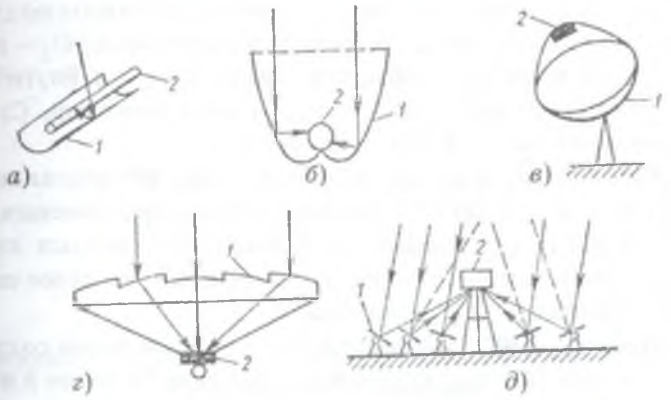


Рисунок 7.6. *Концентраторы солнечной энергии: а) параболо-цилиндрический концентратор с трубчатым приемником излучения; б) фоклин; в) параболоидный концентратор; г) линза Френеля; д) поле гелиостатов с центральным приемником излучения; 1 – отражатель; 2 – приемник излучения*

7.2. Теоретическая работа КСЭ

Полезная энергия, отводимая из коллектора в данный момент времени, – это разность количества солнечной энергии, поглощенной пластиной коллектора, и количества энергии, теряемой в окружающую среду. Уравнение, которое применимо для расчета почти всех существующих конструкций плоского коллектора, известно как уравнение Хоттеля-Уиллера-Блиса и имеет вид:

$$Q = F_R A[(\tau\alpha)I_T - U_L(T_{ср} - T_{окр})], \qquad (7.1)$$

где Q – полезная энергия, отводимая из коллектора за единицу времени, Вт; A – площадь коллектора, м^2; F_R – коэффициент отвода тепла из коллектора; I_T – плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости кол-

лектора, Вт/м^2 ; τ – пропускательная способность прозрачных покрытий по отношению к солнечному излучению; α – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению; U_L – полный коэффициент тепловых потерь коллектора, Вт/(м^2 °С); $T_{ср}$ – температура жидкости на входе в коллектор, °С; $T_{ок}$ – температура окружающей среды, °С.

Каждый из трех приведенных выше коэффициентов [F_R, ($\tau\alpha$), U_L] зависит от конструктивно-физических характеристик коллектора, основными из которых являются тип и число прозрачных покрытий, а также свойства поверхности коллектора.

Примерно 98% энергии в спектре внеземного солнечного излучения приходится на длины волн менее 3 мкм. Когда это излучение достигает стеклянного покрытия, до 90% излучения непосредственно пропускается, а остальная часть отражается или поглощается стеклом. Поглощенная энергия повышает температуру стекла, которое в свою очередь переизлучает энергию с обеих поверхностей – внутренней и наружной. Когда температура пластины коллектора повышается, она также излучает, но в диапазоне длин волн более 3 мкм, за исключением незначительной части энергии, обычно менее 1%, как для абсолютно черной поверхности при 100 °С. Длинноволновое излучение, испускаемое пластиной коллектора, не может непосредственно пройти через стекло, поскольку его пропускательная способность практически равна нулю в диапазоне длин волн 3-50 мкм. Это явление хорошо известно как парниковый эффект, и применение одного или нескольких прозрачных покрытий в значительной мере снижает тепловые потери коллектора. Прозрачные пластмассовые материалы также хорошо пропускают коротковолновое излучение, но обычно имеют заметную пропускательную способность в длинноволновой части спектра. Для прямого излучения пропускательная способность зависит от угла падения, как показано на рис. 7.7, где пропускательная способность одинарного и двойного остекления из особо прочного прозрачного окон-

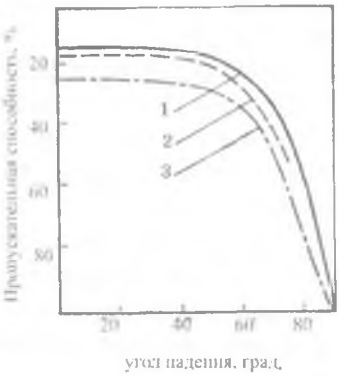


Рисунок 7.7. *Зависимость пропускательной способности от угла падения излучения:*
1 – одинарное остекление; 2 – стекловолокнистая пластмасса; 3 – двойное остекление

ного стекла сравнивается с пропускательной способностью стеклопластика. Стеклопластик имеет исключительно хорошие свойства в длинноволновой области спектра. Каждое прозрачное покрытие снижает как тепловые потери с фронтальной стороны коллектора, так и долю падающей солнечной радиации, которая может достигнуть поверхности поглощающей пластины. С учетом поглощения энергии в каждом покрытии потери на пропускание при углах падения до 35° составляют для одинарного, двойного и тройного остекления соответственно 10, 18 и 25%. Комбинированная изоляция, состоящая из внешнего стеклянного покрытия и внутреннего покрытия из более дешевой прозрачной пластмассовой пленки, может иметь преимущество, поскольку пластмасса обладает более высокой пропускательной способностью, чем стекло, а наружное остекление обеспечивает в определенной степени защиту от атмосферных воздействий. Расстояние между покрытиями или между внутренним покрытием и поглощающей пластиной не является существенным параметром. Согласно справочной литературе, оптимальный зазор составляет от 10 до 13 мм, однако он

может быть увеличен до 25 мм. Характеристики коллектора могут быть улучшены путем нанесения такого прозрачного покрытия на внутреннюю поверхность стекла, которое пропускает практически всю падающую солнечную радиацию, но отражает обратно любое длинноволновое излучение, испускаемое поверхностью пластины коллектора. Обычно используются окись индия и окись олова, а также покрытие, напыляемое в вакууме и имеющее пропускательную способность, равную 0,85 в видимой части спектра (0,55 мкм), и отражательную способность – около 0,97 в инфракрасной части спектра (4,0 мкм).

Согласно формуле (7.1), теплопроизводительность КСЭ зависит также от следующих величин:

- солнечной радиации, поглощаемой пластиной коллектора;
- тепловых потерь.

Солнечная радиация, падающая на коллектор, в любой момент времени состоит из трех частей: прямой радиации, диффузной радиации и радиации, отраженной от земли или окружающих предметов, количество которой зависит от угла наклона коллектора к горизонту и характера этих предметов. Когда проводятся испытания коллектора, плотность потока радиации I_T измеряют с помощью пиранометра, установленного под тем же, что и коллектор, углом наклона к горизонту. Измерения через короткие промежутки времени не обязательны для расчета долгосрочных характеристик системы солнечного теплоснабжения, если существуют результаты испытаний коллектора.

Плотность потока солнечной радиации, поглощаемой пластиной коллектора в некоторый момент времени, равна произведению плотности потока падающей радиации I_T, пропускательной способности системы прозрачных покрытий τ и поглощательной способности пластины коллектора α. Обе последние величины зависят от материала и угла падения солнечного излучения (т. е. угла между нормалью к поверхности и направлением солнечных

лучей). Прямая, диффузная и отраженная составляющие солнечной радиации поступают на поверхность коллектора под различными углами. Поэтому оптические характеристики и должны рассчитываться с учетом вклада каждой из компонент.

Коллектор теряет тепло различными способами. Потери тепла от пластины к прозрачным покрытиям и от верхнего покрытия к наружному воздуху происходят путем излучения и конвекции, но соотношение этих потерь в первом и втором случаях различно. Потери тепла через изолированные днище и боковые стенки коллектора обусловлены теплопроводностью. Коллекторы должны проектироваться таким образом, чтобы все тепловые потери были наименьшими.

Произведение полного коэффициента потерь U_L и разности температур ($T_{ср} - T_{окр}$) в уравнении (7.1) представляет собой потери тепла от поглощающей пластины при условии, что ее температура всюду равна температуре жидкости на входе. При нагревании жидкости пластина коллектора имеет более высокую температуру, чем температура жидкости на входе. Это необходимое условие переноса тепла от пластины к жидкости. Поэтому фактические потери тепла от коллектора больше значения произведения $U_L(T_{ср} - T_{окр})$. Разница потерь учитывается с помощью коэффициента отвода тепла F_R.

Коэффициент отвода тепла F_R равен отношению фактической полезной энергии, когда температура жидкости в коллекторе увеличивается в направлении потока к полезной энергии, при этом температура всей поглощающей пластины равна температуре жидкости на входе.

Коэффициент F_R зависит от расхода жидкости через коллектор и конструкции поглощающей пластины (толщины, свойств материала, расстояния между трубами и т. п.) и почти не зависит от интенсивности солнечной радиации и температур поглощающей пластины и окружающей среды.

Полный коэффициент потерь U_L равен сумме коэффициентов потерь через прозрачную изоляцию, днище и

боковые стенки коллектора. Для хорошо спроектированного коллектора сумма последних двух коэффициентов обычно составляет около 0,5-0,75 Вт/(м^2/$^\circ$C). Коэффициент потерь через прозрачную изоляцию зависит от температуры поглощающей пластины, числа и материала прозрачных покрытий, степени черноты пластины в инфракрасной части спектра, температуры окружающей среды и скорости ветра. Для большинства конструкций коллектора коэффициент U_L можно рассчитать с помощью графиков или уравнений. Однако лучше всего эту величину определять экспериментальным путем.

Следует различать мгновенные характеристики коллектора (т. е. характеристики в данный момент времени, зависящие от метеорологических и рабочих условий в этот момент), и его долгосрочные характеристики. На практике коллектор системы солнечного теплоснабжения работает в широком диапазоне условий в течение года. В некоторых случаях рабочий режим характеризуется высокой температурой и низкой эффективностью коллектора, в других случаях, наоборот, низкой температурой и высокой эффективностью.

Для рассмотрения работы коллектора при переменных условиях необходимо определить зависимость его мгновенных характеристик от метеорологических и режимных факторов. Для описания характеристик коллектора необходимы два параметра, один из которых определяет количество поглощенной энергии, а другой – потери тепла в окружающую среду. Эти параметры лучше всего определяются в результате испытаний, в которых измеряется мгновенная эффективность коллектора в соответствующем диапазоне условий.

7.3. Испытания коллекторов солнечной энергии

Для испытаний солнечных коллекторов часто используют методику Национального бюро стандартов США. Согласно этой методике, испытания проводят на

экспериментальном стенде в стационарных условиях, когда солнечная радиация, скорость ветра, температура наружного воздуха и температура жидкости на входе слабо меняются в течение некоторого времени, так что температура жидкости на выходе и полезная энергия также практически постоянны во времени. Условия опытов, в том числе скорость ветра, должны соответствовать реальным условиям работы коллектора. В процессе испытаний тщательно измеряют плотность потока падающей солнечной радиации, температуру наружного воздуха, расход и температуру жидкости на входе и выходе из коллектора. Полезная энергия коллектора определяется выражением:

$$Q = AGc_p (T_{вых} - T_{вх}), \qquad (7.2)$$

где G – расход жидкости на 1 м^2 площади коллектора; c_p – теплоемкость жидкости; $T_{вых}$ – температура жидкости на выходе из коллектора.

По результатам испытаний обычно определяется эффективность коллектора:

$$\eta = Q / AI_T \qquad (7.3)$$

Испытания коллекторов проводят либо в натуральных условиях – примерно в полдень ясного дня, либо в помещении с применением солнечного имитатора. В обоих случаях диффузная составляющая радиации мала и падающее излучение направлено почти по нормали к поверхности коллектора. В результате значение приведенной поглощательной способности, определяемой из этих опытов, соответствует прямой радиации, падающей по нормали к поверхности, и обозначается $(\tau\alpha)_n$.

Результаты испытаний лучше всего представить в виде графика зависимости мгновенной эффективности коллектора от параметра $(T_{ср} - T_{окр})/I_T$. В основе такой формы представления опытных данных лежит уравнение (7.1). Разделив обе части этого уравнения на AI_T, получим следующее выражение эффективности коллектора:

$$\eta = Q / AI_T = FR(\tau\alpha)_n - F_R U_L (T_{ср} - T_{окр}) / I_T.$$

При условии, что U_L = const зависимость эффективности коллектора от параметра $(T_{ср} - T_{окр}) / I_T$ линейна, причем угловой коэффициент прямой равен $(-F_R U_L)$, а координата точки пересечения с вертикальной осью составляет $F_R(\tau\alpha)_n$. Это наиболее удобная форма представления экспериментальных данных, поскольку значения $F_R(\tau\alpha)_n$ и $F_R U_L$ необходимы в гл. 5 для расчета долгосрочных характеристик системы солнечного теплоснабжения.

Результаты испытаний плоских коллекторов различного типа были представлены в такой форме Симоном. Типичные данные для коллекторов с жидким теплоносителем показаны на рис. 7.8. Обычно существует разброс экспериментальных точек относительно прямой линии. Этот разброс обусловлен как изменением VI, с температурой и скоростью ветра, так и погрешностью измерений. При использовании *f*-метода для расчета систем солнечного теплоснабжения результаты испытаний коллекторов достаточно аппроксимировать уравнением прямой линии (это означает, что U_L можно считать постоянной величиной).

Важными характеристиками, определяющими наклон этой прямой и положение точки ее пересечения с осью ординат, являются число прозрачных покрытий и свойства поглощающей поверхности пластины (окрашена ли она черной матовой краской или имеет селективное покрытие). Из рис.7.8 видно, что взаимное расположение прямых изменяется в зависимости от диапазона рабочих температур. Поэтому нельзя сказать, какого типа коллектор лучше всего использовать в системе, пока не будут проведены расчеты. Кроме того, стоимости коллекторов также неодинаковы.

На эффективность системы солнечного теплоснабжения оказывает влияние наличие различных типов теплообменников в данной системе.

В районах, где возможно замерзание жидкости в коллекторе, солнечные установки часто выполняются с про-

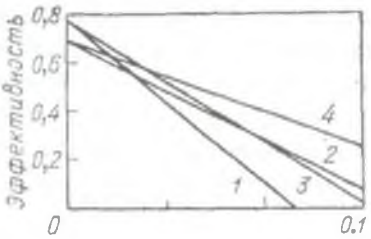


Рисунок 7.8. *Эффективность коллекторов различного типа с жидкостным теплоносителем: 1 – с одним прозрачным покрытием и матово-черной поглощающей пластиной; 2 – с двумя прозрачными покрытиями и неселективной поглощающей пластиной; 3 – с одним прозрачным покрытием и селективной поглощающей пластиной; 4 – с двумя прозрачными покрытиями и селективной поглощающей пластиной*

межуточным теплообменником, разделяющим коллектор и бак-аккумулятор. При этом в контуре коллектора используют раствор антифриза, а в контуре аккумулятора – воду. Хотя этот теплообменник не является частью коллектора, целесообразно ввести понятие эффективного коэффициента отвода тепла F_R', подстановка которого в уравнение (7.1) вместо F_R позволяет рассчитать характеристики коллектора с учетом влияния теплообменника. Отношение F_R'/F_R называют поправочным коэффициентом, учитывающим влияние теплообменника. Этот коэффициент, значения которого изменяются от 0 до 1, характеризует уменьшение полезной энергии коллектора вследствие применения двухконтурной схемы отвода тепла с промежуточным теплообменником. Обычно определяют зависимость коэффициента F_R'/F_R от параметров коллектора, массовых расходов в теплообменнике и эффективности последнего ε_c:

$$F_R'/F_R = [1 + (F_R U_L / G_{cp})(AG_{cp} / \varepsilon_c C_{min}) - 1]^{-1},$$

где C_{min} – меньший из двух водяных эквивалентов в теплообменнике (водяным эквивалентом называется произ-

ведение массового расхода жидкости и ее теплоемкости). Если массовые расходы через теплообменник одинаковы, то C_{min} относится к потоку жидкости в контуре коллектора, поскольку теплоемкость раствора антифриза меньше теплоемкости чистой воды. Зависимость коэффициента F_R / F_R от параметров $G_{cp} / F_R U_L$ и с C_{min} / AG_{cp} показана на рис. 7.9.

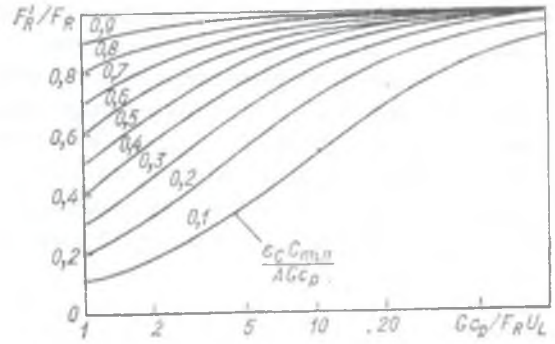


Рисунок 7.9. *Поправочный коэффициент, учитывающий влияние теплообменника на отвод тепла из коллектора*

7.4. Солнечная радиация, поглощаемая пластиной КСЭ

Как указывалось выше, одним из основных факторов, определяющих эффективность систем солнечного теплоснабжения, является поступление солнечной радиации на поверхность коллектора солнечной энергии.

Для определения поступления солнечной радиации на поверхность коллектора солнечной энергии необходимо знание прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность, а затем пересчет этого значения на наклонную поверхность, т.е. поверхность коллектора солнечной энергии.

Средние месячные значения дневных приходов солнечной радиации на горизонтальную поверхность известны для многих географических пунктов и приведены в

соответствующих справочниках. Ниже приводятся месячные значения прихода суммарной, прямой, диффузной и отраженной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для территории Казахстана.

Таблица 7.2

Месячный приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность H_G, МДж/м² (в числителе – при ясном небе; в знаменателе – при средних условиях облачности)

Месяц	Широта, град. с.ш.				Месяц	Широта, град. с.ш.			
	40	45	50	55		40	45	50	55
Январь	348	277	201	134	Июль	909	897	888	884
	210	155	134	84		800	763	658	620
Февраль	440	377	310	243	Август	817	788	763	746
	302	264	218	155		767	712	574	553
Март	645	595	549	478	Сентябрь	649	612	570	515
	406	406	402	360		595	515	411	306
Апрель	796	754	708	679	Октябрь	515	461	406	327
	570	524	490	473		402	331	251	176
Май	909	897	880	872	Ноябрь	365	293	222	163
	754	725	649	595		239	165	134	88
Июнь	926	922	913	918	Декабрь	302	235	168	105
	804	746	691	658		176	134	105	50

Таблица 7.3

Месячный приход прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность H_D, МДж/м² (в числителе – при ясном небе; в знаменателе – при средних условиях облачности)

Месяц	Широта, град. с.ш.				Месяц	Широта, град. с.ш.			
	55	50	45	40		55	50	45	40
Январь	96	151	218	281	Июль	729	746	746	742
	29	63	50	105		360	377	524	570
Февраль	176	226	285	348	Август	612	645	662	679
	63	113	151	189		344	364	515	570
Март	369	436	486	532	Сен-	427	478	507	536
	184	218	218	214	тябрь	180	276	369	448
Апрель	545	582	616	649	Ок-	260	327	377	427
	243	281	314	360	тябрь	80	147	214	277
Май	721	737	754	767	Ноябрь	126	180	235	293
	323	398	473	503		42	67	71	147
Июнь	779	775	771	767	Декабрь	71	117	176	239
	390	444	536	574		17	55	71	92
Годовая	4911		5401			5832		6260	
	2254		2803			3507		4098	

Таблица 7.4

Месячный приход рассеянной Hd (в числителе) и отраженной H_g (в знаменателе) солнечной радиации на горизонтальную поверхность, МДж/м²

Месяц	Широта, град. с.ш.				Месяц	Широта, град. с.ш.			
	55	50	45	40		55	50	45	40
Январь	55 59	71 88	105 80	105 63	Июль	260 117	281 138	239 184	230 201
февраль	92 113	105 138	113 130	113 80	Август	210 109	210 122	197 180	197 201
Март	176 230	184 197	189 147	193 101	Сентябрь	126 63	134 88	147 130	147 193
Апрель	230 147	210 105	210 126	210 134	Октябрь	96 46	105 46	117 88	126 109
Май	272 113	251 130	251 168	251 180	Ноябрь	48 50	67 59	84 50	92 63
Июнь	268 126	247 138	210 180	230 193	Декабрь	34 34	50 63	63 63	84 46
Годовая	1865 1207		1915 1311		1923 1525			1978 1563	

Таблица 7.5

Среднемесячный дневной приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность за пределами земной атмосферы H_0, МДж/м²

Месяц	Широта, град. с.ш.				Месяц	Широта, град. с.ш.			
	40	45	50	55		40	45	50	55
Январь	15.1	12.0	9.0	6.1	Июль	40.3	40.0	39.6	39.1
февраль	20.3	17.5	14.5	11.5	Август	36.2	35.1	33.8	32.4
Март	27.2	24.8	22.3	19.5	Сентябрь	29.7	27.7	25.4	23.0
Апрель	34.3	32.8	31.2	29.3	Октябрь	22.3	19.6	16.7	13.8
Май	39.3	38.8	38.1	37.2	Ноябрь	16.3	13.3	10.3	7.3
Июнь	41.4	41.3	41.2	40.9	Декабрь	13.6	10.6	7.6	4.8

Изменение плотности потока солнечного излучения в течение суток I_h можно принять происходящим по синусоидальному закону:

$$I_n = I_{hmax}\, sin\,(\pi t'/T_c) = I_{hmax}\, sin\,\lambda,$$

где I_{hmax} – максимальное значение плотности солнечной радиации в наиболее высокой точке нахождения Солнца в рассматриваемые сутки (местный полдень); π – в радианах; t' – время после восхода Солнца, которое определяется с учетом принятой модели изменения солнечной

радиации в сутки ($0\ t\ T_c$); T_c – продолжительность светового дня.

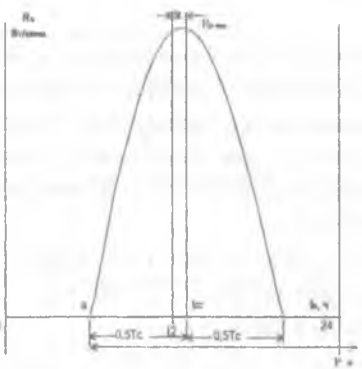


Рисунок 7.10. *Модель изменения I_h в течение суток*

Суточный приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность определяется выражением:

$$H_{D\,сут} = H_{D\,мес} / N,$$

где $H_{D\,мес}$ – месячный приход прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность; N – количество дней месяца.

Максимальное значение плотности солнечной радиации можно определить через суточное поступление прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность, Вт/м²:

$$I_{hmax} = [(\pi/2) \cdot T_{c1}]\, H_{D\,сут}.$$

Метод расчета средних для каждого месяца дневных приходов солнечной радиации на ориентированную в южном направлении наклонную поверхность был разработан Лю и Джорданом.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило Клейну сделать вывод о возможности применения этого метода для расчетов прихода радиации на наклонные поверхности, ориентированные в юго-восточном или юго-западном направлении.

Среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность равен:

$$H_T = R \cdot H, \tag{7.4}$$

где H_T – среднемесячный дневной приход суммарной радиации на наклонную поверхность; H – среднемесячный дневной приход суммарной радиации на горизонтальную поверхность; R – отношение среднемесячных дневных приходов суммарной радиации на наклонную и горизонтальную поверхности.

Предполагая, что рассеянное излучение изотропно, т.е. равномерно распределено по небосводу, отношение R можно представить в виде:

$$R = (1 - \frac{H_d}{H}) \cdot R_b + \frac{H_d}{H} \cdot \frac{1 + \cos S}{2} + p \cdot \frac{1 - \cos S}{2}, \tag{7.5}$$

где H_d – среднемесячный дневной приход рассеянной радиации на горизонтальную поверхность; R_b – отношение среднемесячных приходов прямой радиации на наклонную и горизонтальную поверхности; S – угол наклона коллектора к горизонту; p – отражательная способность подстилающей поверхности.

Первый, второй и третий члены в правой части уравнения (7.5) представляют соответственно доли прямого и рассеянного излучения небосвода и излучения, отраженного от земной поверхности на поверхность коллектора. В случае, если отсутствуют метеоданные о приходе рассеянной радиации, то ее приход можно определить в зависимости от коэффициента облачности и среднемесячного дневного прихода суммарной солнечной радиации.

Доля диффузной составляющей в суммарной солнечной радиации зависит от показателя облачности K_m:

$$K_m = H / H_0, \tag{7.6}$$

где H – суммарная солнечная радиация; H_0 – среднемесячный дневной приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность за пределами земной атмосферы.

Зависимость доли диффузной солнечной радиации от показателя облачности можно проиллюстрировать при помощи рис. 7.11.

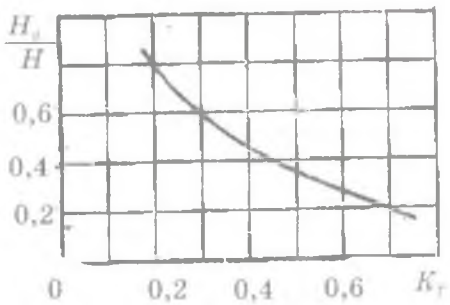


Рисунок 7.11. *Зависимость доли диффузной радиации от показателя облачности* K_m

Данная зависимость также может быть представлена аналитически как:

$$\frac{H_d}{H} = 1{,}39 - 4{,}03 \cdot K_T + 5{,}53 \cdot K_T^{\,2} - 3{,}11 \cdot K_T^{\,3} \qquad (7.7)$$

Теоретически отношение R_b является функцией пропускательной способности атмосферы. Однако эту величину можно определить как отношение приходов внеатмосферной радиации на наклонную и горизонтальную поверхности. При больших отклонениях от южной ориентации для расчета R_b можно использовать метод, предложенный Клейном:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - s) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s' + /180 \cdot \omega_s \cdot \sin(\varphi - s) \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + /180 \cdot \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \cdot \sin\delta}, \qquad (7.8)$$

где ω_s – часовой угол захода Солнца на горизонтальные поверхности, равный:

$$\omega_s = arc\cos(-tg\varphi \cdot tg\delta),$$

где ω_s' – часовой угол захода Солнца на наклонные поверхности;

$$\omega_{s}' = \min\{\omega : \arccos[-tg(\varphi - s)\cdot tg\delta]\},$$

где δ – склонение Солнца;

$$\delta = 23{,}45\cdot\sin\left[360\frac{284+n}{365}\right],$$

где n – порядковый номер дня года.

Как следует из выражения (7.4), численное значение коэффициента R в значительной мере определяет количество попадающего солнечного излучения на поверхность коллектора солнечной энергии.

Проанализируем полученные нами результаты.

Наибольшее значение коэффициент R принимает в зимние месяцы ($R = 2 \ldots 4$) и наименьшие в летние месяцы ($R = 0{,}8 \ldots 0{,}9$). Прослеживается тенденция к снижению численного значения коэффициента R по мере продвижения с севера на юг. Следовательно, наибольшее влияние наклон коллектора солнечной энергии на количество падающей на него солнечной радиации будет иметь на более высоких широтах.

Величина коэффициента R, а следовательно, и количество поступающей солнечной радиации на наклонную поверхность в значительной степени зависит от угла наклона поверхности к горизонту. Наибольшие относительные изменения величины R наблюдаются в интервале углов, равных $\varphi \pm 15^{\circ}$, где φ – широта местности. По мере увеличения длительного угла от величины 15 градусов все изменения величины R происходят значительно медленнее. Поэтому следует согласиться с тем, что оптимальным углом наклона коллекторов солнечной энергии к горизонту будут являться углы в пределах $\varphi \pm 15^{\circ}$.

Зависимость между поступающей солнечной радиацией на наклонную поверхность и углом наклона ее к горизонту не является величиной постоянной. Она в течение года меняется не только по абсолютному значению, но также и по направлению. Анализ экспериментальных данных показывает, что в зимние месяцы с увеличением угла наклона поверхности к горизонту происходит увеличение поступающей солнечной радиации на ее по-

верхность. В осенне-весенний период происходит некоторое выравнивание, а в летние месяцы увеличение угла наклона поверхности к горизонту приводит к уменьшению поступающей на ее поверхность солнечной радиации.

На основании полученных данных появляется возможность определения угла наклона коллектора солнечной энергии к горизонту, в зависимости от технологического назначения системы солнечного теплоснабжения и сезонности ее функционирования. Наиболее оптимальными следует признать следующие углы наклона коллектора к горизонту:

а) в зимние месяцы угол наклона увеличивается;

б) в осенне-весенний период он должен быть равен широте местности;

в) в летнее время его необходимо уменьшать.

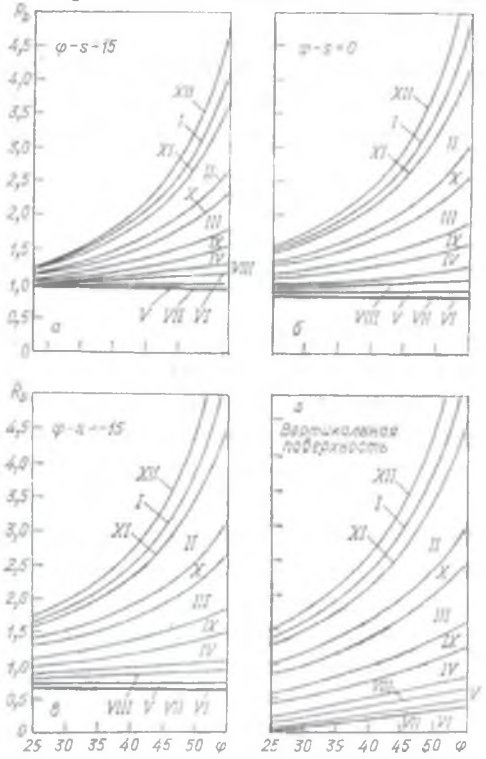


Рисунок 7.12. *Величина R_b для ориентированных на юг поверхностей (римскими цифрами указаны месяцы)*

7.5. Почасовое поступление солнечной радиации

Численные значения суточного поступления солнечной радиации помогают определить среднесуточную производительность гелиосистем. В тех случаях, когда необходимо более тесно связать технологический процесс с производительностью гелиосистемы, невозможно обойтись без знания почасового поступления суммарной солнечной радиации.

Для определения почасового значения суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, необходимо воспользоваться выражением:

$$\frac{H_h}{H} = \frac{\cos\tau - \cos\tau_0}{24 \cdot \sin\tau_0 - \tau_0 \cos\tau_0}, \qquad (7.9)$$

где H_h – солнечная радиация за отдельный часовой интервал; H – среднесуточная суммарная солнечная радиация; τ – часовой угол Солнца, соответствующий середине часового интервала:

$$\tau = \frac{f}{12},$$

где f – время в часах, отсчитываемых от момента истинного солнечного полудня;

τ_0 – часовой угол Солнца в моменты восхода и захода (постоянный для каждого месяца).

Для получения часовых приходов солнечной радиации можно также воспользоваться соотношением Луи и Джордана, представленным в графической форме на рис.7.13.

Среднесуточное значение суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность можно определить на основании многолетних актинометрических наблюдений. Среднечасовое значение суммарной радиации на горизонтальную поверхность будет определяться:

$$H_{Gh} = H_{Dh} + H_{dh}, \qquad (7.10)$$

где H_{Gh} – среднечасовая суммарная радиация на горизонтальную поверхность; H_{Dh} – среднечасовая прямая ради-

ация на горизонтальную поверхность; H_{dh} – среднечасовая рассеянная радиация на горизонтальную поверхность.

Зная среднюю продолжительность светового дня, при помощи рис. 7.13 определяем численные значения среднечасовой суммарной и рассеянной радиаций H_{Gh} и H_{dh} для определенных интервалов светового дня на горизонтальную поверхность.

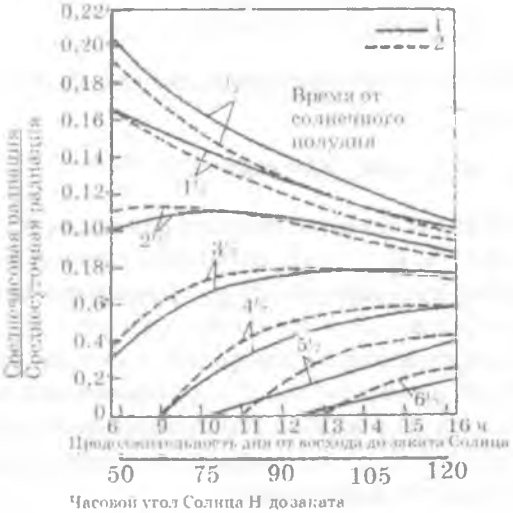


Рисунок 7.13. *Оценка часовых значений радиации на горизонтальную поверхность:*
1 – суммарная радиация; 2 – рассеянная радиация

Численное значение среднечасовой прямой радиации на горизонтальную поверхность H_{Dh} определится как:

$$H_{Dh} = H_{Gh} - H_{dh} \qquad (7.11)$$

От часовых значений солнечной радиации на горизонтальную поверхность можно перейти к соответствующим значениям на наклонную поверхность.

Среднечасовая суммарная радиация на наклонную поверхность:

$$H_{Ghs} = H_{Dhs} + H_{dhs} + H_{ghs}, \quad (7.12)$$

Среднечасовая прямая радиация на наклонную поверхность:

$$H_{Dhs} = H_{Dh} R_h. \quad (7.13)$$

Среднечасовая рассеянная радиация на наклонную поверхность для данного часа:

$$H_{dhs} = H_{dh}[(1+\cos s)/2], \quad (7.14)$$

Среднечасовая отраженная радиация на наклонную поверхность:

$$H_{ghs} = rH_{Gh}[(1-\cos s)/2], \quad (7.15)$$

где H_{Ghs} – среднечасовая суммарная радиация на наклонную поверхность; H_{Dhs} – среднечасовая прямая радиация на наклонную поверхность; H_{dhs} – среднечасовая рассеянная радиация на наклонную поверхность; H_{ghs} – среднечасовая, отраженная от поверхности Земли, радиация на наклонную поверхность; R_h – поправочный коэффициент пересчета радиации с горизонтальной на наклонную поверхности; H_{Dh} – среднечасовая прямая радиация на горизонтальную поверхность.

$$R_h = H_{Dhs} / H_{Dh} = \cos i/\cos z, \quad (7.16)$$

где $\cos i$ – среднечасовой угол падения солнечных лучей на поверхность;

$\cos z$ – среднечасовой угол между положением Солнца в зените и поверхностью.

$$\begin{aligned}\cos i = {} & \sin\delta \sin\varphi \cos s - \sin\delta \cos\varphi \sin s \cos\gamma + \\ & + \cos\delta \cos\varphi \cos s \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin s \cos\gamma + \\ & + \cos\delta \sin s \sin\omega \sin\gamma\end{aligned} \quad (7.17)$$

$$\cos z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad (7.18)$$

где δ – склонение Солнца, градус; φ – широта, градус; s – угол наклона (между поверхностью и горизонталью; вер-

тикальная поверхность дает $s = 90$); ω– часовой угол (до полудня + ω, после полудня – ω); γ – азимутальный угол поверхности (юг = 0°; восток = + γ; запад = – γ).

Среднечасовая рассеянная радиация на наклонную поверхность для данного часа:

$$H_{dhs} = H_{dh}[(1+cos\ s)/2] \qquad (7.19)$$

Среднечасовая отраженная радиация на наклонную поверхность:

$$H_{ghs} = \rho H_{Gh}[(1- cos\ s)/2], \qquad (7.20)$$

где ρ – коэффициент отражения подстилающей поверхности Земли.

7.6. Оптимальная ориентация КСЭ

Пропускательная способность системы прозрачных покрытий τ и поглощательная способность пластины зависят α от угла падения солнечной радиации на поверхность коллектора. В отдельности эти величины нельзя определить из опытов, проводимых по общепринятой методике. В тех опытах определяется произведение величин F, τ и α, поскольку именно оно необходимо для расчета долгосрочных характеристик системы солнечного теплоснабжения.

Проблема состоит в том, что испытания коллектора обычно проводят в условиях, когда падающее излучение почти перпендикулярно поверхности коллектора.

Следовательно, произведение $FR=(\tau\alpha)_n$, определяемое из опытов, как правило, представляет собой величину, соответствующую падению излучения по нормали к поверхности. В зависимости от ориентации коллектора и времени года среднемесячные значения пропускательной и поглощательной способности могут быть значительно меньше, чем при нормальном падении излучения.

Упрощенный метод определения среднемесячных значений приведенной поглощательной способности $\overline{\tau\alpha}$, который может быть использован во многих случаях, состоит в следующем. Когда угол наклона коллектора к горизонту находится в пределах $\varphi - 15^{\circ}$, $\varphi + 15^{\circ}$, а его ориентация отличается от южной не более чем на 15°, отношение $\frac{\overline{\tau\alpha}}{(\tau\alpha)_n}$ для всех месяцев отопительного сезона принимается равным 0,96 для коллектора с одинарным остеклением и 0,94 для – коллектора с двойным остеклением.

Если угол наклона коллектора к горизонту отличается от широты местности более чем на 15°, отношение $\frac{\overline{\tau\alpha}}{(\tau\alpha)_n}$ должно рассчитываться с учетом вклада каждой из составляющих радиации. Согласно формуле, имеем:

$$\frac{\overline{\tau\alpha}}{(\tau\alpha)_n} = \left(1 - \overline{H}_d / \overline{H}\right)\left(\overline{R}_b / \overline{R}\right)\left(\overline{\tau\alpha}\right)_b / (\tau\alpha)_n + \left(\overline{H}_d / \overline{H}\right)\left(1 / \overline{R}\right) \tag{7.21}$$
$$\left[(1 + \cos s)/2\right]\left(\overline{\tau\alpha}\right)_d / (\tau\alpha)_n +] + \rho\left(1 / \overline{R}\right)\left[(1 - \cos s)/2\right]\left(\overline{\tau\alpha}\right)_r / (\tau\alpha)_n,$$

где $\left(\overline{\tau\alpha}\right)_b, \left(\overline{\tau\alpha}\right)_d, \left(\overline{\tau\alpha}\right)_r$ – среднемесячные значения приведенной поглощательной способности по отношению к прямому, диффузному и отражённому от земли излучениям.

На рис. 7.14 *а* показана зависимость отношения $\frac{\tau}{\tau_n}$ от угла падения излучения для коллектора с одним, двумя и тремя листами стекла или пленки Тедлар, а на рис. 7.14 *б* – зависимость $\frac{\alpha}{\alpha_n}$ для матово-черной поглощающей поверхности.

Немногочисленные опубликованные данные показывают, что для селективной поверхности распределение поглощательной способности аналогично распределению для матово-черной поверхности. В дополнение к этой информации достаточно указать среднемесячные значения углов падения прямого, диффузного и отраженного от земли излучений, чтобы определить величину $\frac{\overline{\tau\alpha}}{(\tau\alpha)_n}$.

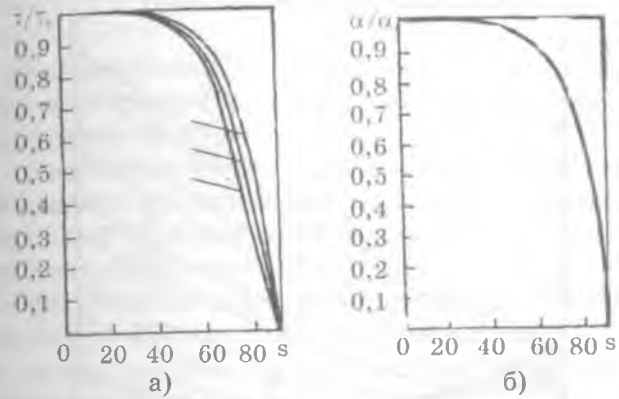


Рисунок 7.14. *Зависимость среднего угла падения прямого солнечного излучения от разности ($\varphi - s$) (римскими цифрами указаны месяцы)*

Для изотропного диффузного излучения средний угол падения на горизонтальную поверхность равен 60°. Если коллектор наклонен к горизонту, средний угол падения диффузного излучения будет меньше 60°, тогда как средний угол падения отраженного от земли излучения будет больше 60°. Средний угол падения диффузного излучения можно принять равным 60°, что занижает оценку прихода диффузной радиации. Для отраженного от земли излучения, вклад которого мал, средний угол падения принимается равным также 60°. Как результат, отношения $\frac{\overline{\tau\alpha}_b}{(\tau\alpha)_n}$ и $\frac{\overline{\tau\alpha}_r}{(\tau\alpha)_n}$ можно рассчитать таким же образом, как и для прямого излучения.

Клейн показал, что для ориентированных на юг поверхностей среднемесячный угол падения прямого излучения $\overline{\theta}_b$ примерно равен углу падения в моменты времени ± 2,5 ч относительно солнечного полудня в день, соответствующий середине месяца. Зависимость $\overline{\theta}_b$ от разности углов $\pm - s$ представлена на рис. 7.15. Отношение $\frac{\overline{\tau\alpha}_b}{(\tau\alpha)}$ равно произведению значений $\frac{\tau}{\bar{\tau}}$ и $\frac{\alpha}{\bar{\alpha}_n}$, соответствующих углу падения $\overline{\theta}_b$.

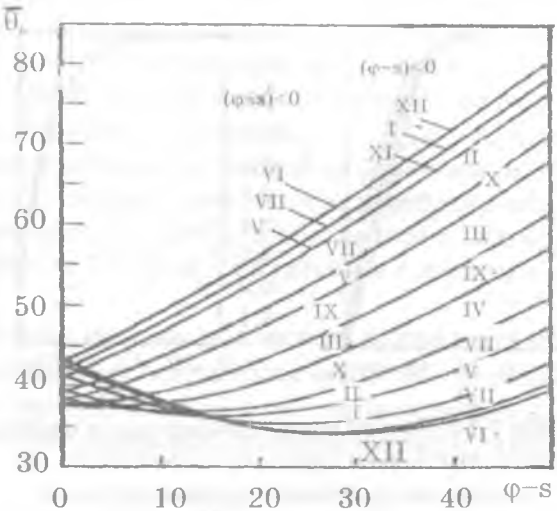


Рисунок 7.15. *Зависимость τ/τ_n (а) и α/α_n (б) от угла падения излучения*

Для поверхностей, ориентация которых отличается от южной ориентации более чем на 15°, не существует простого метода расчета отношения $\frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n}$. Однако это отношение не сильно зависит от азимутального угла. Его значения, вычисленные для строго южной ориентации, с небольшой погрешностью можно использовать для поверхностей, азимут которых по абсолютному значению не превышает 15°.

Произведение $F_R\overline{(\tau\alpha)}_n$, необходимое для расчета долгосрочных характеристик системы, определяется умножением величины $F_R(\tau\alpha)_n$, полученной в результате испытаний коллектора, на отношение $\frac{\overline{\tau\alpha}}{(\tau\alpha)_n}$.

7.7. Повышение эффективности КСЭ

Характеристики плоского пластинчатого приемника и его эффективность при высоких температурах могут быть улучшены в результате:

– уменьшения конвективного переноса между приемной пластиной и стеклянной крышкой, если над первой стеклянной крышкой поместить еще одну дополнительную стеклянную крышку;

– уменьшения радиационных потерь от пластины, если ее поверхность делать не черной, а селективной, т.е. сильно поглощающей, но слабо излучающей в определенной области спектра.

Влияние на характеристики коллектора увеличения числа покрытий и применения селективной поверхности иллюстрируется данными табл. 7.6, в которой приведены значения потерь в окружающую среду через прозрачную изоляцию при средней скорости ветра 5 м/с и температуре наружного воздуха 10 °С. Пластина коллектора рассматривается при температурах 40 и 80 °С; первое значение типично для летних климатических условий, а второе характерно для многих процессов использования тепла. Потери через днище и боковые стенки коллектора не учитываются. Приведенные цифры основаны на данных Даффи и Бекмана.

Таблица 7.6

Потери через прозрачную изоляцию

Температура пластины	Степень черноты в длинноволновом диапазоне	Потери, Вт/м^2		
		одно покрытие	два покрытия	три покрытия
40^0	0,95	189	78	63
	0.1	93	57	45
80^0	0,95	525	280	182
	0.1	263	168	119

Уменьшение потерь энергии в результате применения селективной поверхности становится все более существенным по мере повышения температуры поглощающей пластины. Любое снижение потерь энергии повышает эффективность работы коллектора, и суммарное годовое увеличение полезной энергии, полученное за счет использования селективных покрытий, зависит от числа часов в году, когда плотность потока падающей солнечной радиации достаточно велика, чтобы коллектор мог достигнуть температур, при которых эффект применения селективных поверхностей становится существенным.

Второе покрытие оказывает почти такое же влияние на потери через прозрачную изоляцию, как и хорошая селективная поверхность в том же интервале температур, однако второе покрытие одновременно уменьшает количество солнечной радиации, достигающей поверхности поглощающей пластины. Поэтому при сравнительно небольших разностях температур поглощающей пластины и окружающей среды коллектор с одинарным остеклением обычно является более эффективным. Применение селективной поверхности с двумя покрытиями дает относительно небольшой выигрыш по сравнению с вариантом селективной поверхности и одного покрытия.

Идеальные селективные поверхности. Максимум энергии солнечного излучения, поглощаемой приемником, соответствует длине волны, равной приблизительно 0,5 мкм; максимум энергии, излучаемой приемником, – длине волны 10 мкм. Идеальная поверхность приемника должна по возможности поглощать как можно больше энергии и сводить к минимуму потери, т. е. поверхность должна иметь большой монохроматический коэффициент поглощения α_λ при $\lambda \sim 0{,}5$ мкм и низкий монохроматический коэффициент излучения ε_λ при $\lambda \sim 10$ мкм. Для селективной поверхности справедливо $\alpha_{short} >> \varepsilon_{long}$. В этом случае и есть средние значения α_λ и ε_λ, соответственно, в пределах разных интервалов длин волн.

На рис. 7.16 приведены спектральные характеристики для селективной поверхности, выполненной на основе металла меди (Cu) и полупроводника оксида меди (Cu_2 O).

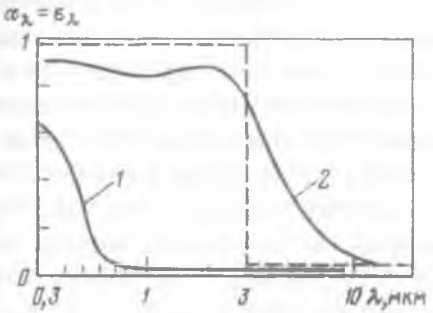


Рисунок 7.16. *Спектральные характеристики различных поверхностей: штриховая линия – идеальная селективная поверхность; 1 – Cu; 2 – Cu_2O;*

На рис. 7.17 показано распределение тепловых потоков при нанесении слоя полупроводника на металлическую поверхность. В этом случае слой полупроводника сильно поглощает коротковолновое солнечное излучение, а металлическая поверхность (подложка) слабо излучает в длинноволновом диапазоне спектра.

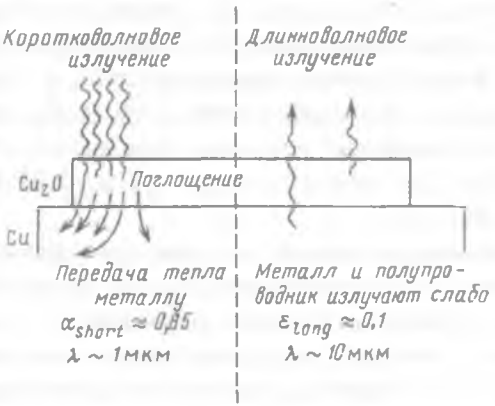


Рисунок 7.17. *Тепловые потоки для одного типа селективных поверхностей*

Структура металл-полупроводник. Некоторые полупроводниковые материалы характеризуются близким к требуемому для идеальной селективной поверхности отношением $\alpha_\lambda / \varepsilon_\lambda$. Полупроводники могут поглощать только фотоны с энергиями, большими ширины запрещенной зоны E_g т.е. энергии, необходимой для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Пороговая энергия E_g соответствует длинам волн, примерно равным 1,1 мкм для Si и 2 мкм для Cu_2O, более короткие волны сильно поглощаются (см. рис. 7.16). Однако низкая механическая прочность, низкая теплопроводность и высокая стоимость полупроводников делают их малопригодными для изготовления всего приемника солнечного излучения.

Металлы прочны, хорошо проводят тепло и относительно дешевы, но, к сожалению, хорошо отражают (т.е. слабо поглощают) излучение в видимой и инфракрасной областях спектра.

Взаимодействие электронов проводимости с падающим на поверхность металла элекромагнитным излучением приводит к изменению частоты колебаний электронов вблизи поверхности. В результате этого большая часть энергии, приобретенной электронами от электромагнитного поля, излучается в виде вторичных волн, которые, складываясь, создают отраженную волну. Энергия отраженной волны незначительно отличается от энергии падающей, поэтому внешнему наблюдателю кажется, что падающее на поверхность металла излучение отражается. Так, для $\lambda >> 1$ мкм α_λ и $\rho_\lambda \approx 0{,}97$,т.е. $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda \approx 0{,}03$ (см. рис.7.16).

Для некоторых металлов характерно повышение коэффициента поглощения при длинах волн падающего излучения ниже определенной длины волны λ_p. Для меди $\lambda_p \approx 0{,}5$ мкм, поэтому медь поглощает в синей области сильнее, чем в красной, и кажется красноватой. Длина волны λ_p соответствует плазменной частоте $f_p = c/\lambda_p$. Происходит увеличение частоты падающего излучения ко-

лебаний электронов, при этом коэффициент поглощения металла возрастает для $f \geq f_p$.

Если слой металла покрыть тонким слоем полупроводника, их характеристики можно скомбинировать. На рис. 7.17 показана схема процесса поглощения коротковолнового излучения (сильно поглощается в полупроводнике), приходящегося на поверхность слоя полупроводника, и передачи тепла металлической подложке. Толщина слоя полупроводника определяется, с одной стороны, необходимостью обеспечения эффективной теплопередачи (теплопроводность полупроводника мала), с другой стороны – требованием поглощения максимальной доли потока излучения, чтобы исключить возможность отражения от поверхности металла, прошедшего через полупроводник излучения. Эффективная длина поглощения в полупроводниках при λ=0,6 мкм обычно составляет около 1 мкм, т.е. 63% приходящего излучения поглощается в слое толщиной 1 мкм и 95% – в слое 3 мкм, следовательно, коэффициент поглощения солнечного излучения достаточно высок. Излучательная способность как металла, так и полупроводника на длинах волн невелика – около 10 мкм ($\varepsilon \approx 0{,}1$).

Полученная в результате сложная поверхность имеет более низкий уровень радиационных потерь, чем простая черная поверхность, которая является черной и для видимого, и для инфракрасного излучения и поэтому имеет $\alpha = \varepsilon \approx 0{,}9$. Коэффициент поглощения у селективной поверхности не такой высокий, как у черной, поскольку α_λ такой поверхности уменьшается для $\lambda \geq 1$ мкм (см. рис. 7.16), а 30% солнечного излучения приходится на диапазон $\lambda > 1$ мкм. Низкая излучательная способность селективной поверхности увеличивается при повышении температуры, при этом возрастают и радиационные потери (пропорционально εT^4). Так, при температуре поверхности 40 °С и $\varepsilon > 0{,}9$ радиационные потери обычно составляют около 20% полных потерь тепла, однако при температуре поверхности 400 °С они составят уже 50%, если ε=0,9, и только 10%, если ε=0,1.

Для получения селективной поверхности медную пластинку погружают в щелочной раствор, при этом на ее поверхности образуется пленка Cu_2O (см. рис. 7.17).

Метод промышленного получения селективных поверхностей и покрытий на медной поверхности заключается в следующем. Медная пластина погружается в раствор, состоящий из одной части хлорноватокислого натрия $NaClO_2$, двух частей гидроокиси натрия NaOH и двадцати частей воды по массе. Пластина должна находиться в растворе в течение десяти минут при температуре около 62 °С. Как обычно, рекомендуется перед погружением очистить и обезжирить пластину. Было установлено, что КПД коллектора с одинарным остеклением и селективной поверхностью, полученной указанным выше способом, примерно на 10% выше КПД обычного коллектора с неселективной поглощающей поверхностью и двойным остеклением.

Некоторые известные в литературе покрытия, наносимые химическим способом, представляют собой совокупность слоев цинка и никеля (черный никель), окись меди на меди и окись меди на алюминии. Технология нанесения черного хрома фирмы «Харшоу Хромоникс» признавалась в 1975 г. одной из лучших, имеющих промышленное значение. Эта модификация хорошо известного метода нанесения обычного декоративного черного хрома гальваническим способом. Сравнение нескольких покрытий типа черный хром с другими селективными покрытиями, используемыми в гелиотехнике, дано в табл. 7.7.

В лабораторных условиях получены различные селективные поверхности, но на практике использовать можно лишь некоторые из них, так как одни слишком дорогостоящие, другие слишком хрупкие или с плохо воспроизводимыми параметрами; иногда характеристики поверхностей меняются со временем (процесс старения). Для некоторых селективных поверхностей, отличных от описанной структуры Cu/Cu_2O, могут быть существенны интерференция волн в тонких пленках, многократные отражения на шероховатостях поверхности металла.

Таблица 7.7

Характеристики селективных покрытий

Покрытие	Поглощательная способность a_s	Степень черноты*	Отношение поглощательной способности к степени черноты
Черный никель на оцинкованном железе	0,89	0,12	7,42
(можно получить)	0,89	0,16 — 0,18	5,56 — 4,94
Гидроокись натрия, хлорноватокислый натрий на меди	0,87	0,13	6,69
[illegible] хром на матовом никеле	0,923	0,085	10,86
Черный хром на полированном никеле	0,868	0,088	9,86
Черный никель	0.867 — 0,877	0,066 — 0,109	7,95-13,29
Черная краска Hexlel	0,967	0,967	1

* Данные по поглощательной способности относятся к спектральному распределению при массе атмосферы, равной 2, а по степени черноты – к температуре абсолютно черного тела 121 °С.

Изготовление селективных поверхностей обходится дороже, чем простая окраска поверхности приемника в черный цвет. Вследствие этого, а также из-за низкого коэффициента поглощения при невысоких температурах такие поверхности в настоящее время нецелесообразно использовать для приемников, работающих при температурах ниже 60 С. Однако при температурах, составляющих сотни градусов Цельсия (например, в солнечных башнях), требуются селективные поверхности, которые способны в течение нескольких лет сохранять достаточно высоким отношением $\alpha_{short} / \varepsilon_{long}$, например, равным 30.

Вакуумированные приемники. Использование селективно-поглощающей поверхности приводит к значитель-

ному снижению радиационных потерь в приемнике. Для достижения еще более высоких температур (например, температур около 100 С или выше, в которых особенно нуждается промышленность) необходимо уменьшить также и конвективные потери. Одним из способов является размещение дополнительных стеклянных покрытий над плоским приемником. Лучшим, но технически более сложным способом является вакуумирование пространства между приемной поверхностью и ее стеклянной крышкой.

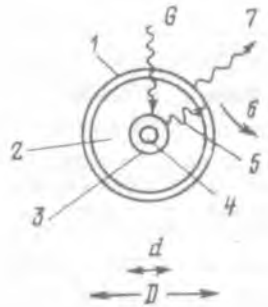


Рисунок 7.18. *Вакуумированный приемник: 1 – покрытие из стекла; 2 – вакуум; 3 – селективное покрытие на поверхности внутренней стеклянной стенки; 4 – жидкость; 5 – излучение; 6 – конвекция; 7 – излучение (T_1 – приемная пластина, жидкость; T_2 – покрытие из стекла; $T_{окр}$ – окружающий воздух)*

Основным элементом вакуумированного приемника является двойная трубка. Внешняя трубка изготовлена из стекла, так как оно прозрачно для солнечного излучения, но непрозрачно для теплового. Внутренняя трубка также обычно изготавливается из стекла, широко используемого в вакуумной технике. Степень обезгаживания отожженного стекла (пирекса) такова, что давление может поддерживаться ниже 0,1 Па в течение 300 лет, что в 10^{12} раз дольше, чем при использовании медной трубки. Внутренняя трубка имеет кольцевое сечение, это по-

зволяет довольно хрупкому стеклу противостоять действию напряжений, возникающих в нем из-за перепада давлений между жидкостью внутри трубки и вакуумом снаружи. Обычно внешний диаметр трубок D=2 см, d=1см. Соответствующим образом соединяя такие трубки, можно сконструировать приемник, который будет принимать как направленное, так и диффузное солнечное излучение.

Для увеличения подвода тепловой энергии к внутренней трубке и, соответственно, увеличения температуры на выходе можно использовать концентраторы или отражатели внутри вакуумированной трубки.

7.8. Расчет систем СТС (f-метод расчета СТС)

Наиболее приемлемым и простым методом для расчета систем солнечного теплоснабжения и горячего водоснабжения является f-метод. Пользуясь f-методом и ориентируясь на средние месячные значения метеорологических параметров, можно определить долгосрочные тепловые характеристики систем солнечного теплоснабжения в зависимости от основных конструктивных параметров этих систем. С учетом стоимостных показателей f-метод можно применять также и для оптимизации параметров данных систем.

Рассмотрим основные положения f-метода расчета систем солнечного теплоснабжения и горячего водоснабжения.

Энергетический баланс системы солнечного теплоснабжения (СТС) за месячный период времени можно представить в виде:

$$Q - L + E = \Delta U, \qquad (7.22)$$

где Q – месячная теплопроизводительность солнечной установки; L – сумма месячных нагрузок отопления и горячего водоснабжения; E – общее количество энергии, полученной в течение месяца от дублирующего источни-

ка энергии; ΔU – изменение количества энергии в аккумулирующей установке.

При размерах аккумуляторов, обычно применяемых в СТС, разность ΔU мала по сравнению с Q, L и E и может быть принята равной нулю. Тогда уравнение (7.22) можно записать в виде:

$$f = (L - E)/L = Q/L, \qquad (7.23)$$

где f – доля полной месячной тепловой нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии.

Коэффициент замещения f эмпирически можно связать с двумя безразмерными комплексами:

$$X = F_R U_L (F'_R/F_R)(T_r - T_o)\,\Delta t\,(A/L), \qquad (7.24)$$

$$Y = F_R(\tau\alpha)_n\,(F'_R/F_R[(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n]H_T N(A/L), \qquad (7.25)$$

где A – площадь солнечного коллектора, м^2; F'_R – эффективный коэффициент отвода тепла, учитывающий влияние теплообменника; U_L – полный коэффициент тепловых потерь коллектора, Вт/(м^2/°С); T_r – базисная температура, принятая равной 100 °С; T_0 – среднемесячная температура наружного воздуха, °С; t – число секунд в месяце; L – полная месячная тепловая нагрузка, Дж; $(\tau\alpha)$ – среднемесячная приведенная поглотительная способность; H_T – среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность коллектора, Дж/м^2; N – число дней в месяце; $(\tau\alpha)_n$ – приведенная поглощательная способность прямой солнечной радиации, падающей по нормали к поверхности коллектора; τ – пропускательная способность прозрачных покрытий по отношению к солнечному излучению; α – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению; F_R – коэффициент отвода тепла из коллектора; F'_R/F_R – поправочный коэффициент, учитывающий влияние теплообменника.

Безразмерные комплексы X и Y имеют определенный физический смысл: Y можно трактовать как отношение количества энергии, поглощаемой пластиной коллектора в течение месяца, к полной месячной тепловой нагрузке; X – отношение месячных тепловых потерь коллектора при базисной температуре к полной месячной тепловой нагрузке.

На рис.7.19 представлена зависимость между коэффициентом замещения f и безразмерными комплексами X и Y для двухконтурной жидкостной системы. Данная корреляция была получена с помощью математической модели в результате многих сотен расчетов для различных географических пунктов в широком диапазоне изменения основных параметров системы. Эти графики называются f-графиками системы солнечного отопления с жидкостным теплоносителем.

Чтобы определить долю f полной месячной тепловой нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, необходимо рассчитать комплексы X и Y для рассматриваемого коллектора и данной месячной тепловой нагрузки. Значение f определяется по графику в точке с координатами X и Y. Например, при $X=4$ и $Y=1$ получается, что f=0, 57. Эта операция повторяется для каждого месяца года. Месячное количество тепловой энергии от СТС находится умножением f на полную месячную тепловую нагрузку L. Доля F годовой тепловой нагрузки, покрываемой за счет солнечной энергии, равна сумме месячных количеств солнечного тепла, деленной на полную годовую нагрузку.

Зависимость между X, Y и f, представленную на рис.7.19, можно аппроксимировать следующим уравнением:

$$f=1,029Y-0,065X-0,245Y^2+0,0018X^2+0,02215Y^3, \quad (7.26)$$

где $0<Y<3$ и $0<X<18$.

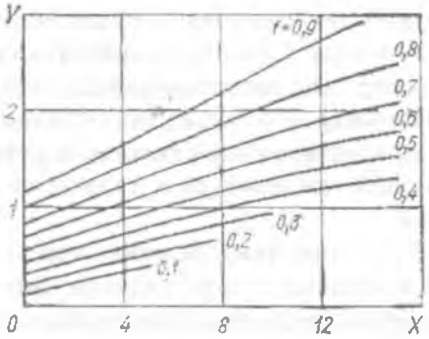


Рисунок 7.19. *f – графики для системы с жидкостным теплоносителем*

Расчет коэффициента *f* в зависимости от *X* и *Y* проводился при фиксированных значениях трех параметров: расхода жидкости через коллектор; вместимости аккумулятора; размера водо-воздушного теплообменника относительно нагрузки отопления.

Результаты математического моделирования и корреляция получены при условии, что расход жидкости через коллектор эквивалентен расходу антифриза 0, 015 л/(м^2/с). Но поскольку изменение расхода обычно мало влияет на характеристики системы, то корреляция для систем с жидкостным теплоносителем, представленная здесь, применима и при других, встречающихся на практике расходах жидкости.

Уравнение (7.26) или графики на рис.7.19 получены при условии, что вместимость аккумулятора составляет 75 л/м^2. При других количествах воды в аккумуляторе необходимо вводить поправку.

Также необходимо вводить поправки, учитывающие влияние теплообменника.

ГЛАВА 8. ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ

8.1. Понятие ветроэнергетики

Ветродвигателями называются двигатели, преобразующие энергию ветрового потока в механическую или электрическую энергию. Непостоянство и разреженность этой энергии обусловливают конструктивные особенности ветродвигателей: наличие приспособлений, обеспечивающих возможность работы двигателя на высоких скоростях ветра, с некоторой, примерно постоянной мощностью, и ограничивающих число оборотов ветроколеса; относительная громоздкость ветродвигателей.

Комплекс научных и практических вопросов использования энергии ветра с помощью ветродвигателей составляет техническую дисциплину – *ветротехнику.*

Основная задача ветротехники состоит в создании ветродвигателей и ветроустановок, способных вырабатывать удобную для применения энергию и работать с высоким коэффициентом использования энергии ветра.

Ветроэнергетика может быть разделена на следующие части:

- теория и экспериментальные исследования ветродвигателей;
- проектирование ветродвигателей;
- изучение структуры и энергии ветрового потока;
- монтаж и рациональная эксплуатация ветроустановок.

Важнейшим разделом ветроэнергетики является теория и экспериментальные исследования ветродвигателей, базирующиеся на *аэродинамике* – науке, изучающей движение воздуха и исследующей действие воздуха на соприкасающиеся с ним тела.

Аэродинамика, в свою очередь, подразделяется на теоретическую и экспериментальную.

Теоретическая аэродинамика основана на законах механики, применяемых к газообразным телам; *экспериментальная* – на результатах опытных исследований, проводимых в аэродинамических трубах и в природных условиях.

При проектировании ВЭУ необходимо учитывать следующие особенности режимов их работы, оказывающих значительное влияние на создаваемое электрооборудование:

• целесообразность сохранения постоянного значения коэффициента быстроходности ветроколеса (создается изменением частоты вращения при изменении скорости ветра) для обеспечения максимальной эффективности его работы. Это требование должно согласовываться с требованием поддержания постоянной частоты и значения генерируемого напряжения;

• достаточная сложность в управлении механических систем частотой вращения ветроколеса. Дешевле и эффективней это можно обеспечить регулированием частоты вращения электрическим путем;

• оптимальная частота вращения ветроколеса тем меньше, чем больше его радиус. Только при очень малых размерах ветроколеса (до 2 м), а следовательно, и малых мощностях ВЭУ можно осуществить его непосредственное соединение с генератором. При более значительных размерах ветроколеса и мощностях приходится использовать мультипликаторы, альтернативой которым могут являться новые конструкции многополюсных генераторов, работающих при низких частотах вращения, но выдающих в сеть напряжение промышленной частоты;

• ВЭУ является сложной механической системой с упругими связями, содержащей распределенные массы. Это делает систему склонной к возникновению собственных колебаний, которые могут попадать в резонанс с вынужденными колебаниями, обусловленными колебаниями ветрового потока или электрической нагрузки;

• вследствие частых изменений скорости и направления ветра на ВЭУ существуют колебания и изменения вырабатываемой мощности;

• для ВЭУ больших мощностей с горизонтальной и особенно с вертикальной осью вращения требуется обеспечивать принудительный пуск.

8.2. Понятие о происхождении ветра

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание солнцем земной поверхности.

Обратимся к рисунку 8.1, при помощи которого можно проиллюстрировать процесс образования ветра.

Допустим, что вследствие неравномерного нагревания солнечными лучами горизонтальная поверхность земли на участке АБ нагрелась больше, чем на участке БВ.

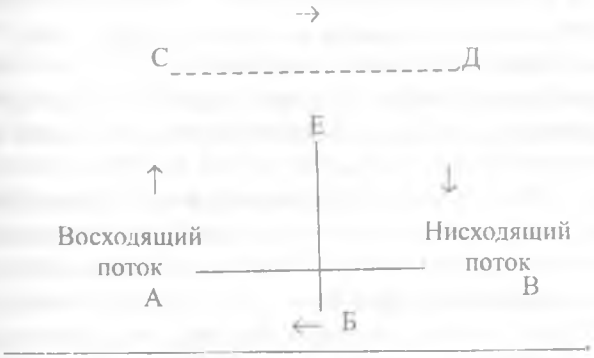


Рисунок 8.1. *Схема образования воздушных течений*

Вместе с тем и воздух, соприкасающийся с землей, над участком АБ нагреется больше, чем над участком БВ. Воздушный столб над участком АБ расширится больше, чем над участком БВ. На некотором уровне СД давление на участке СЕ станет больше прежнего. В связи с этим воздух потечет в направлении СЕД. На уровне АБВ, т.е. на земной поверхности, вследствие происходящего переме-

щения воздуха вверх над участком АБ давление уменьшится; давление же над более холодным участком БВ будет больше. Поэтому внизу воздух потечет от участка БВ к участку АБ, т.е. в направлении, обратном перемещению вверх. В результате получается циркуляция воздуха, показанная на рисунке стрелками.

Неравномерное распределение тепла между различными участками земли обусловливает циркуляционное движение воздуха земной атмосферы.

Неоднородность земной поверхности (суша, океаны, горы, леса) обусловливает различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений.

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

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

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

Таким образом, возникает циркуляция воздуха с направлением внизу – к суше, вверху – от суши к морю. Ночью над сушей воздух охлаждается сильнее, чем над морем, поэтому направление циркуляции изменяется: внизу воздух течет к морю, а вверху – с моря на сушу. Зона распространения бриза – около 40 км в сторону моря и 40 км в сторону суши. Высота распространения бризов в наших широтах достигает 200-300 м. В тропических странах бризы наблюдаются почти в течение всего года, а в умеренном поясе только летом при жаркой погоде. В Казахстане бризы можно наблюдать летом у берегов Каспийского моря, озера Балхаш.

Годовые изменения температуры в береговых районах больших морей и океанов также вызывают циркуляцию, аналогичную бризам, но с годовым периодом. Эти циркуляции более крупного размера, чем бризы, называются муссонами. Возникают муссоны по следующим причинам. Летом континент нагревается сильнее, чем окружающие его моря и океаны; благодаря этому над континентом образуется пониженное давление, и воздух устремляется к континенту от океанов, а вверху, наоборот, течет от континентов к окружающим океанам. Эти ветры носят название морских муссонов. Зимой континенты значительно холоднее, чем поверхность моря; над ними образуется область повышенного давления; вследствие этого нижние слои воздуха направляются от континента к океанам, а верхние, наоборот, от океанов к континентам. Эти ветры называются материковыми муссонами.

8.3. Характеристики ветровых потоков

Структура ветрового потока за наблюдаемый промежуток времени характеризуется следующими показателями:

- средней скоростью ветра;
- порывистостью ветра;
- изменчивостью ветра;
- длительностью провалов и подъемов скоростей ветра выше или ниже среднего значения.

Средняя скорость ветра определяется как средняя арифметическая величина, полученная из ряда мгновенных скоростей ветра, измеренных через равные интервалы в изучаемом промежутке времени:

$$V_{ср} = \frac{\sum_{1}^{n} \vartheta_i}{n},$$

где $V_{ср}$ – средняя скорость ветра; ϑ_i – значение мгновенной скорости ветра; n – количество мгновенных замеров.

Порывистостью ветра называется величина отклонения мгновенного значения скорости ветра от средней величины. Порывистость ветра характеризует глубину провалов-подъемов скорости ветра и представляется предельным, средним и наиболее вероятным (среднеквадратичным) значениями:

$$\sigma_{пред} = V_{пред} - V_{ср},$$

где $V_{пред}$ – наибольшее или наименьшее значение мгновенной скорости ветра в течение наблюдаемого промежутка времени;

$$\sigma_{ср} = \frac{\sum_{1}^{n}(v_i - v_{ср})}{n};$$

$$\sigma_{ср\,кв} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(v_i - v_{ср})^2}{n}}.$$

Изменчивость ветра представляет собой скорость изменения ветрового потока и представляется наибольшим и средним значениями:

$$\delta_{наиб} = \frac{(v_{макс} - v_{мин})}{\Delta t},$$

где Δt – длительность интервала между мгновенными замерами;

$$\delta_{ср} = \frac{\sum_{1}^{n}\frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t_i}}{n}.$$

Длительности провалов и подъемов скорости ветра представляют собой величины интервалов ($\Delta\tau$), в течение которых скорость ветра имеет значения большие или меньшие, чем скорость ветра за наблюдаемый отрезок времени.

Для определения повторяемости скоростей ветра за определенный промежуток времени можно использовать одну из наиболее распространенных функций распреде-

ления, каковым является распределение Вейбулла. Двухпараметрический закон Вейбулла хорошо зарекомендовал себя для целого ряда задач, решение которых требует сведений о вероятностных характеристиках скорости ветра.

Случайная положительная величина имеет распределение Вейбулла, если ее функция распределения записывается в виде:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right],$$

где a и b– положительные постоянные.

Для плотности вероятности справедливо уравнение:

$$f(x) = \frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right]$$

В качестве энергетических характеристик ветровых потоков можно указать следующие характеристики.

Кинетическая энергия ветрового потока, как всякого движущегося тела, имеющего секундную массу m, равна:

$$A = \frac{mv^2}{2}t.$$

Мощность ветрового потока определяется как:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{\rho F v^3}{2},$$

где $\rho = \frac{\gamma}{g}$– массовая плотность воздуха;

γ– удельный вес воздуха;

g– ускорение силы тяжести;

F – площадь, ометаемая ветроколесом;

v– скорость ветра.

Выражение для определения удельной мощности ветрового потока, протекающего через сечение А, имеет вид, Вт:

$$P_{уд} = (^1/_2)\rho v^3,$$

где ρ– плотность воздуха кг/м^3; v – скорость воздуха, м/с.

Величина массовой плотности воздуха зависит от значений барометрического давления и температуры. Данную величину можно определить либо по известным выражениям, или же по соответствующим таблицам:

$$\rho = \rho_0 \frac{BT_0}{B_0 T} = 0{,}125 \frac{B(273+15)}{760(273+t^0)},$$

где $\rho_0 = 1{,}25 \frac{кГ \cdot сек^2}{м^4}$ – массовая плотность воздуха при температуре t= 15 °С и атмосферном давлении B_0 = 760 мм рт.ст.;

B и t^0 – соответственно, атмосферное давление, мм рт. ст., и температура воздуха в новых условиях, °С;

T_0 и T – абсолютные температуры воздуха при 15°С и в новых условиях.

Величина массовой плотности воздуха для Республики Казахстан с учетом среднемесячных значений температур колеблется от 1,18 до 1,38 кг/м^3.

Удельное значение энергии ветрового потока W (энергия, протекающая через 1 м^2 поперечного сечения) зависит от повторяемости различных градаций скоростей ветра, т.е. от того, какую долю времени t_i наблюдалась скорость ветра, и определяется выражением:

$$W_{уд} = 1/2\rho \sum_{i=1}^{n} t_i v_i^3 = \sum_{i=1}^{n} P_{уд i} t_i,$$

где n – число градаций скоростей ветра.

Скорость ветра классифицируется метеослужбами по исторически сложившейся шкале Бофорта, в основе которой лежат визуальные наблюдения (табл. 8.1). Скорость ветра при стандартных метеорологических измерениях определяется осреднением за 10-минутный отрезок времени показаний анемометра, находящийся на 10-метровой высоте. Эти измерения могут повторяться каждый час, но обычно они проводятся значительно реже, поэтому по ним трудно судить о флуктуациях скорости ветра и его направлениях, что необходимо для расчета

характеристик ветроустановок. Для непрерывного измерения скорости ветра можно использовать специальные анемометры, но они тоже довольно инерционны.

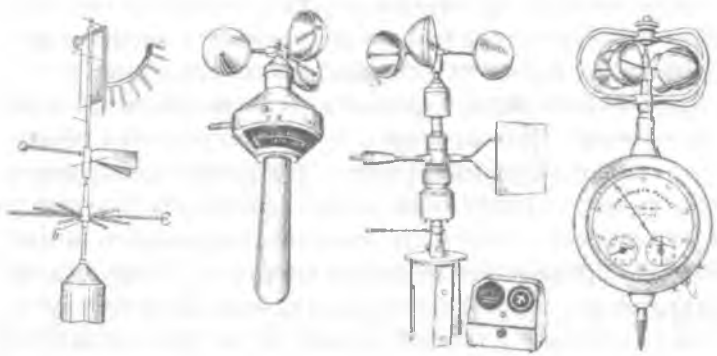
Направление ветра определяется стороной света, откуда дует ветер. Метеоданные о направлении ветра обычно представляют в виде *розы ветров*, показывающей среднюю скорость ветра в различных направлениях. На розе вместо средней скорости могут быть показаны для каждого направления распределения ветра по скорости. Информация о направлении ветра чрезвычайно важна, когда ветроустановки размещают в горной местности, вблизи зданий или других ветроустановок, т.е. в тех случаях, когда возможно их затенение при некоторых направлениях ветра.

Скорость ветра, измеренная за очень короткий период (1-2 с), называется мгновенной, или действительной. Для измерения мгновенной скорости ветра используется флюгер Вильда или малоинерционные анемометры; осредненную скорость за длительные промежутки измеряют анемометрами различных типов. *Флюгер Вильда* имеет подвешенную металлическую пластину, которая благодаря повороту флюгера всегда перпендикулярна к направлению ветра. Ветер отклоняет пластину, и по величине угла наклона можно определить скорость ветра на данный момент времени.

Анемометр (рис. 8.2) состоит из крестовины с чашками-полушариями на ее концах и коробки со счетчиком. Неодинаковые формы поверхностей вызывают разность давлений по обе стороны вертикальной оси крестовины, вследствие чего она вращается.

Цифры на счетчике анемометра покажут число метров, на которые переместился воздушный поток за время наблюдения. Замеры (длительностью 2 минуты) можно повторить и определить среднюю скорость ветра за определенный промежуток времени.

Средние скорости ветра существенно меняются в течение суток, месяца и сезона. В соответствии с этим различают суточный, месячный, сезонный и годовой ход скорости ветра.



а) *б)* *в)* *г)*

Рисунок 8.2. *Инструменты для измерения скорости ветра:*
а) анемометр с доской (флюгер); б) ручной индукционный анемометр; в) анеморумбометр электрический; г) ручной анемометр с полушариями для замера средних скоростей ветра

На земной поверхности в суточном ходе скорости ветра минимум наблюдается в ночные часы, когда ветер часто ослабевает до штиля. После восхода солнца ветер обычно усиливается, и скорость его достигает максимума в 13-14 часов. Затем скорость ветра снова уменьшается. Изменение скорости ветра днем происходит быстрее, чем ночью. Такой характер суточного хода скорости ветра наблюдается в слое около 100 м летом и около 50 м зимой.

Годовой ход скорости ветра зависит от климатических условий. В умеренных широтах северного полушария максимум скорости ветра наблюдается в зимнее время года, минимум – летом. Объясняется это тем, что в зимнее время контрасты температур между экватором и полюсом больше, чем летом, и, соответственно, больше горизонтальных барических градиентов, которые являются силой, приводящей в движение массы воздуха.

Таблица 8.1

Сила ветра по шкале Бофорта и ее влияние на ВЭУ и условия их работы

Баллы Бофорта	Скорость ветра, м с	Характеристика ветра	Наблюдаемые эффекты действия	Воздействие ветра на ВЭУ	Условия работы ВЭУ при средней скорости ветра
1	2	3	4	5	6
0	0,0 - 0,4	Штиль	Дым из труб поднимается вертикально	Нет	Отсутствуют
1	0,4-1,8	Тихий	Дым поднимается не совсем отвесно, но флюгеры неподвижны. На воде появляется рябь		
2	1,8-3,6	Легкий	Ветер ощущается лицом, шелестят листья, на воде отчетливое волнение		Плохие для всех установок
3	3,6 - 5.8	Слабый	Колеблются листья на деревьях, на отдельных волнах появляются барашки (гребни)	Вращаются тихоходные ветроколеса	Удовлетворительные для насосов и некоторых аэрогенераторов
4	5,8 - 8,5	Умеренный	Колеблются тонкие ветви деревьев, на воде много барашков	Начинают вращаться колеса аэрогенераторов	Хорошие для аэрогенераторов

1	2	3	4	5	6
5	8,5-11	Свежий	Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в барашках	Мощность ВЭУ достигает 30% проектной	Очень хорошие
6	11-14	Сильный	Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят телефонные провода, пенятся гребни волн	Мощность близка к максимальной	Приемлемы для прочных малых установок
7	14-17	Крепкий	Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена	Максимальная мощность	Предельно допустимые
8	17-21	Очень крепкий	Ломаются ветки деревьев, трудно идти против ветра, с волн срываются клочья пены	Ряд ВЭУ начинает отключаться	Недопустимые
9	21-25	Шторм	Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы	Все ВЭУ отключаются	
10	25-29	Сильный шторм	Значительные разрушения, деревья вырываются с корнем	Предельные нагрузки	
11	29-34	Жестокий шторм	Широкомасштабные разрушения	Повреждения некоторых ВЭУ	
12	>34	Ураган	Опустошительные разрушения	Серьезные повреждения ВЭУ	

8.4. Географические изменения скоростей ветра

Скоростью ветра называют путь в метрах, проходимый массой воздуха в течение 1 секунды. Скорость ветра постоянно меняется по величине и направлению. Основной причиной этих изменений является неравномерное нагревание земной поверхности и неравномерности рельефа местности.

Скорость ветра является важнейшей энергетической характеристикой ветра. Измеряется скорость ветра специальными приборами – анемометрами.

На станциях гидрометеослужбы принято 8-разовое измерение скорости ветра через каждые 3 часа. Измерения скорости ветрового потока производятся на высоте 10 м от земной поверхности, т.е. согласно стандартной методике.

В зависимости от имеющейся аппаратуры для измерения скорости ветра и целей исследований можно определять среднюю часовую, среднесуточную, среднемесячную и среднегодовую скорости ветра.

По данным метеостанций, за многолетний период наблюдений можно сделать общие выводы о распределении средних скоростей ветра.

Суточный ход скоростей ветра характеризуется тем, что максимальные скорости обычно наблюдаются в середине или во второй половине светового дня. В течение суток летом в равнинных местностях скорости ветра наиболее сильны днем и имеют наименьшее значение ночью. В нагорных и предгорных областях ночные скорости ветра сильнее дневных. Зимой скорости ветра примерно одинаковы по значению ночью и днем.

Как правило, районы, расположенные у побережья морей, отличаются наиболее сильными ветрами.

О распределении скоростей ветра по территории Республики Казахстан можно судить по рис. 8.3-8.5, на которых приведены зоны средних годовых скоростей ветра по регионам Казахстана, а также месяцы годовых минимума и максимума средней скорости ветра.

Последовательное уменьшение скоростей ветра с севера на юг климатически закономерно для равнинного Казахстана. Здесь имеет место определенная зональность, что хорошо прослеживается по территориальному распределению средней многолетней годовой скорости ветра. Выделяются восточное побережье Каспийского моря и ряд горных районов республики, отличающихся местными ветровыми условиями. В основных степных и лесостепных районах Казахстана, примерно к северу от Уральска-Тургая-Караганды-Павлодара, средние многолетние скорости ветра преимущественно колеблются в пределах 4,5–5,0 м/с. К югу от этой зоны, за исключением восточного побережья Каспийского моря, основных пустынных массивов юга и юго-востока Казахстана, а также узкой зоны, проходящей с севера на юг через Семипалатинск-Уч-Арал, средние за год скорости ветра снижаются до 4,0–4,5 м/с.

Внутри этой части республики выделяется массив со среднегодовой скоростью ветра 3–4 м/с.

В пустынях Кызыл-Кум, Бекпак-Дала и в Приаральских песках средние годовые скорости ветра снижаются до 3...4 м/с. С приближением к горным массивам, расположенным на юге, юго-востоке и востоке Казахстана, скорости ветра уменьшаются до 2–3 м/с, а по узкой предгорной зоне – даже до 1–2 м/с в среднем за год. В этих районах республики, как и в других ее частях, выделяются очаги с повышенными годовыми скоростями ветра. К их числу следует отнести такие районы, как Джунгарские ворота, Курдайский перевал и т.д.

Незначительные скорости ветра на крайнем юге, юго-востоке и востоке Казахстана обусловливаются в основном высокими и мощными горами Алтая, Джунгарии, Тянь-Шаня и т.д., создающими на значительном расстоянии от себя широкую зону относительного ветрового затишья. Однако в межгорных проходах, а также на горных перевалах возникают местные условия усиления ветра.

В табл. 8.2 представлены результаты обработки метеоданных о средних скоростях ветра за 7-летний период.



I– $\upsilon_{ср.г.}$ = 1–2 м/с; II – $\upsilon_{ср.г.}$ = 1–2 м/с; III – $\upsilon_{ср.г.}$ = 1–2 м/с;
IV – $\upsilon_{ср.г.}$ = 1–2 м/с; V – $\upsilon_{ср.г.}$ = 1–2 м/с; VI– $\upsilon_{ср.г.}$ = 1–2 м/с;
VII– $\upsilon_{ср.г.}$ = 1–2 м/с

Рисунок 8.3. *Распределение среднегодовых скоростей ветра по территории Казахстана*

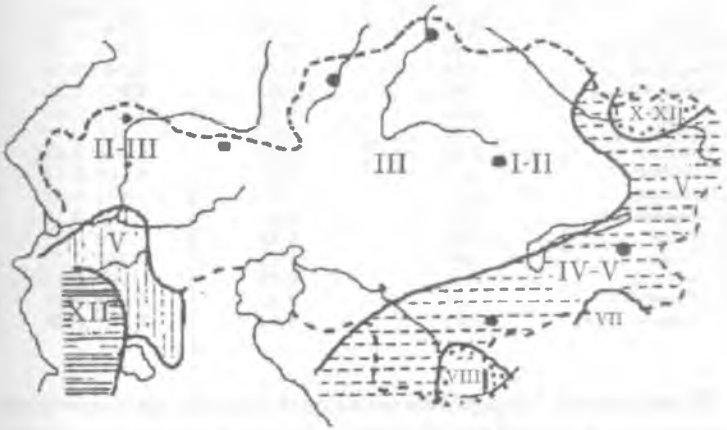


Рисунок 8.4. *Месяцы годового максимума скоростей ветра*



Рисунок 8.5. *Месяцы годового минимума скоростей ветра*

Таблица 8.2

Результаты статистической обработки метеоданных о средних годовых скоростях ветра за 7-летний период по Республике Казахстан

Пункт наблюдения	Математическое ожидание	Среднеквадратичное отклонение	Доверительный интервал для математического ожидания
1, Астана	4,24	0,40	4,24 ± 0,23
2, Петропавловск	5,30	0,54	5,30 + 0,31
3, Костанай	4,55	0,49	4,60 ± 0,28
4, Кокшетау	4,92	0,62	4,92 + 0,35
5, Атырау	4,51	0,53	4,51 ± 0,30
6, Актобе	3,10	0,23	3,10 + 0,13
7, Уральск	2,89	0,44	2,90 + 0,25
8, Караганда	4,11	0,27	4,11 + 0,15
9, Павлодар	4,29	0,31	4,30 + 0,18
10, Жезказган	3,22	0,28	3,22 + 0,16
11, Актау	5,90	0,47	5,90 + 0,27
12, Семей	2,66	0,22	2,70 + 0,12
13, Алматы	1,44	0,23	1,44 + 0,13
14, Шымкент	2,11	0,50	2,11 + 0,28
15, Талдыкорган	2,14	0,44	2,14 + 0,28

В таблице 8.3 представлены результаты многолетних наблюдений за средними скоростями ветрового потока (более 30 лет) метеостанций Республики Казахстан.

Проанализируем месячный и годовой ход изменения скорости ветра по регионам Республики Казахстан согласно табл. 8.2 и 8.3.

Таблица 8.3

Средняя месячная и годовая скорость ветра по регионам Республики Казахстан, м/с

Станция и область	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Северо-Казахстанская													
1. Булаево	3,6	3,7	3,8	3,8	3,8	3,4	2,9	2,9	3,2	3,7	3,8	3,6	3,5
2. Петропавловск	5,7	5,8	6,0	5,6	5,5	4,8	4,2	4,0	4,5	5,4	5,8	5,6	5,2
3. Благовещенка	5,0	5,2	5,3	4,8	5,0	4,3	3,7	3,6	4,1	4,9	5,1	5,0	4,7
4. Явленка	4,5	4,8	4,7	4,6	4,7	4,0	3,3	3,2	3,7	4,6	4,6	4,6	4,3
5. Тайынша	5,1	5,2	5,3	5,1	5,1	4,6	3,8	3,7	4,1	4,9	5,2	5,1	4,8
6. Володарское	4,0	4,1	4,3	3,9	4,0	3,6	3,2	3,1	3,4	4,2	4,3	3,9	3,8
7. Рузаевка	4,4	4,5	4,7	4,3	4,2	3,8	3,2	3,0	3,3	4,1	4,4	4,4	4,0
Костанайская													
8. Комсомол	3,6	3,8	4,1	4,1	4,5	4,0	3,5	3,4	3,7	4,0	3,8	3,6	3,8
9. Костанай	4,3	4,6	4,9	4,6	4,8	4,3	3,9	3,7	4,0	4,6	4,5	4,5	4,4
10. Кушмурун	4,4	4,4	4,3	4,1	4,2	3,9	3,5	3,3	3,4	4,0	4,0	4,2	4,0
11. Джетыгара	5,4	5,3	5,3	5,0	5,0	4,6	4,4	4,1	4,7	5,2	5,4	5,6	5,0
12. Наурызымский заповедн.	4,9	5,2	5,1	4,8	4,7	4,3	4,1	3,8	3,9	4,4	4,6	4,7	4,5
13. Аркалык	6,0	6,6	6,2	5,6	5,4	5,0	4,7	4,6	4,5	5,4	5,9	5,9	5,5
14. Амангельды	5,0	5,1	5,1	4,9	4,5	4,1	4,0	3,8	3,9	4,4	4,5	4,6	4,5
15. Тургай	4,9	5,1	5,2	4,9	4,7	4,6	4,6	4,5	4,4	4,6	4,6	4,7	4,7

Станция и область	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Акмолинская													
16. Кокшетау	5,9	6,0	5,7	5,1	5,5	4,9	4,3	4,3	5,0	6,3	6,5	6,1	5,5
17. Щучинск	3,3	3,5	3,9	4,0	4,2	3,7	3,3	3,0	3,3	4,0	3,9	3,5	3,6
18. Казгородок	4,7	4,6	4,8	4,6	4,5	4,0	3,8	3,7	3,8	4,4	4,5	4,6	4,3
19. Акколь	4,4	4,4	4,7	4,2	4,3	3,8	3,4	3,2	3,5	4,3	4,6	4,4	4,1
20. Атбасар	5,4	5,4	5,8	5,3	5,5	4,8	4,5	4,4	4,7	5,3	5,6	5,6	5,2
21. Астана	5,2	5,1	5,4	5,2	5,0	4,4	4,1	4,0	4,1	5,1	5,3	5,1	4,8
22. Бирлик	4,0	4,2	3,9	4,3	4,2	3,9	4,0	3,7	3,6	4,1	4,0	3,7	4,0
Павлодарская													
23. Михайловка	4,5	4,6	4,7	4,7	4,8	4,2	3,3	3,4	3,7	4,4	4,8	4,6	4,3
24. Ертыс	3,8	3,9	4,1	4,1	4,5	3,8	3,2	3,2	3,4	3,9	4,0	3,9	3,8
25. Павлодар	4,8	4,8	4,8	4,9	4,9	4,4	3,8	3,7	3,9	4,8	4,9	4,6	4,5
26. Экибастуз	4,6	4,7	4,5	4,5	4,6	4,1	3,6	3,6	3,7	4,7	5,0	4,5	4,3
27. Баянаул	3,9	3,7	3,8	3,5	3,6	3,2	2,9	2,8	3,0	3,9	4,2	4,0	3,5
Западно-Казахстанская													
28. Уральск	3,1	2,9	2,9	2,8	2,7	2,4	2,3	2,3	2,4	2,9	3,0	3,0	2,7
29. Шынгырлау	5,0	5,2	5,1	4,8	4,5	4,0	3,9	3,8	3,7	4,3	4,4	5,0	4,5
30. Джамбейты	5,2	5,3	5,3	4,8	4,5	4,4	4,2	4,0	4,1	4,7	4,8	5,2	4,7
31. Фурманов	5,0	4,8	4,9	4,6	4,2	4,0	3,8	3,6	3,6	4,0	4,4	4,9	4,3
32. Калмыково	4,4	4,4	4,3	4,1	4,1	4,1	3,6	3,5	3,5	4,0	3,9	4,2	4,0
33. Орда	4,4	4,6	4,8	4,8	4,6	4,1	3,9	3,7	3,6	4,1	4,3	4,4	4,3
Атырауская													
34. Атырау	6,0	6,2	6,2	6,0	5,6	5,2	5,0	4,6	4,6	5,0	5,5	5,7	5,5
35. Забурунье	4,9	5,0	5,1	5,2	4,8	4,4	4,1	4,0	3,9	4,3	4,6	5,1	4,6
36. Ганюшкино	4,9	5,0	5,2	5,4	4,8	4,5	3,9	3,6	3,8	4,2	4,6	5,0	4,6

Станция и область	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Мангыстауская													
37. Сам	4,4	4,6	4,8	4,5	4,1	3,8	3,8	3,4	3,4	3,6	3,9	4,3	4,0
38. Бейнеу	6,0	5,9	5,7	5,2	4,9	4,5	4,4	4,3	4,3	4,8	5,2	5,6	5,1
39. Форт-Шевченко	7,1	7,1	6,8	6,5	5,7	5,5	5,3	5,3	5,9	6,4	7,0	7,0	6,3
40. Тушыкудык	4,5	5,1	5,2	5,2	5,1	4,7	5,0	4,7	4,5	4,2	4,4	4,4	4,8
41. Актау	5,3	5,0	5,0	4,7	4,2	4,1	4,1	4,0	4,2	4,5	4,9	5,0	4,6
42. Аккудык	2,8	3,1	3,4	3,4	3,4	3,3	3,1	2,8	2,6	2,5	2,5	2,6	3,0
Актюбинская													
43. Мартук	3,8	4,0	4,0	3,7	3,6	3,3	3,2	3,0	2,9	3,4	3,3	3,6	3,5
44. Актобе	4,2	4,3	4,7	4,3	4,2	3,9	3,6	3,4	3,5	4,3	3,9	4,2	4,0
45. Карабутак	4,0	4,2	4,4	4,3	4,1	3,8	3,7	3,4	3,4	4,1	4,0	3,8	4,0
46. Ойыл	4,4	4,6	4,7	4,3	4,0	3,8	3,6	3,3	3,3	4,0	4,1	4,4	4,0
47. Иргиз	4,6	5,2	5,2	5,2	4,8	4,7	4,4	4,2	4,0	4,4	4,4	4,3	4,6
48. Мугоджарская	6,5	7,5	6,4	5,9	5,0	4,4	4,1	4,1	4,0	5,0	5,9	6,9	5,1
49. Челкар	4,8	5,3	5,5	5,3	4,6	4,4	4,1	3,7	3,7	4,5	4,6	4,7	4,6
50. Аяккум	3,6	3,9	4,0	4,0	3,6	3,6	3,4	3,2	3,0	3,3	3,5	3,6	3,6
Карагандинская													
51. Караганда	4,7	5,1	5,2	4,8	4,8	4,5	4,0	3,8	3,9	4,6	4,9	4,9	4,6
52. Каркаралинск	4,5	4,3	4,4	4,4	4,3	3,9	3,5	3,4	3,6	4,6	4,6	4,4	4,2
53. Бес-Оба	3,7	3,6	3,7	3,7	3,7	3,5	3,2	3,0	3,1	4,1	4,0	3,6	3,6
54. Жанаарка	4,7	4,8	4,6	4,5	4,3	4,1	3,8	3,7	3,7	4,3	4,3	4,3	4,3
55. Актогай	2,3	2,5	2,7	3,3	3,3	3,2	3,0	2,9	2,7	3,0	2,4	2,2	2,8
56. Кызылжар	4,0	4,2	4,2	4,3	4,1	4,1	3,8	3,7	3,3	3,7	3,6	3,6	3,9
57. Караакпай	3,8	4,2	4,5	4,4	4,3	4,0	3,9	3,7	3,3	3,9	3,8	3,7	4,0
58. Жезказган	3,7	4,3	4,4	4,7	4,5	4,3	4,2	4,0	3,5	3,7	3,6	3,5	4,0

Станция и область	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
59. Моинты	2,5	2,8	3,1	3,9	3,9	3,8	3,7	3,6	3,2	3,1	2,8	2,5	3,2
60. Жетыконыр	3,9	4,4	4,5	4,5	4,1	3,8	3,8	3,6	3,2	3,6	3,4	3,6	3,9
61. Балхаш	4,9	5,1	5,1	4,8	4,8	4,7	4,5	4,5	4,6	4,5	4,6	4,6	4,7
62. Бетпакдала	4,7	5,3	5,0	4,6	4,3	4,2	4,1	4,0	3,6	3,8	3,7	4,2	4,3
Восточно-Казахстанская													
63. Семиярка	3,8	3,7	3,8	4,2	4,4	4,0	3,6	3,6	3,5	4,2	4,2	3,8	3,9
64. Семей	3,0	2,9	2,8	2,9	3,0	2,7	2,5	2,3	2,2	2,8	3,0	2,9	2,8
65. Чалобай	4,2	3,7	3,1	3,0	2,9	2,7	2,5	2,4	2,4	3,2	3,8	4,2	3,2
66. Кокпекты	1,6	1,9	2,1	3,0	3,3	3,0	2,9	2,9	2,7	2,5	2,0	1,7	2,5
67. Баршатас	3,0	3,4	3,6	4,0	3,8	3,6	3,4	3,6	3,3	3,1	2,4	2,8	3,4
68. Аягуз	3,7	4,4	4,4	4,6	4,4	4,1	4,0	4,1	3,8	3,9	3,7	3,7	4,1
69. Аксуат	1,4	1,6	1,7	2,3	2,5	2,2	2,1	2,0	1,9	1,7	1,4	1,3	1,8
70. Бахты	2,2	2,4	2,7	3,3	2,8	2,3	2,0	2,0	2,3	2,4	2,2	2,2	2,4
71. Шемонаиха	2,8	2,6	2,7	3,2	3,5	3,2	2,9	2,8	2,6	3,1	3,0	3,0	3,0
72. Риддер	2,6	2,4	2,6	2,6	2,7	2,2	1,9	1,9	2,3	3,3	2,9	2,6	2,5
73. Усть-Каменогорск	2,2	2,0	2,0	2,8	3,2	2,6	2,2	2,1	2,2	2,7	2,9	2,5	2,5
74. Зыряновск	0,3	0,4	0,6	1,0	1,6	1,2	0,9	0,9	0,8	0,8	0,6	0,4	0,8
75. Большенарымское	1,2	1,3	1,4	2,2	2,6	2,3	2,2	2,2	1,9	1,9	1,7	1,3	1,8
76. Катон-Карагай	4,2	3,8	3,6	3,9	3,8	3,3	2,9	3,1	3,2	3,6	3,7	4,0	3,6
77. Самарское	0,8	1,0	1,4	2,5	2,7	2,2	2,1	2,1	1,8	1,6	1,4	0,9	1,7
78. Орловка	0,4	0,5	0,6	1,4	2,1	1,6	1,3	1,3	1,3	1,0	0,6	0,4	1,0
79. Зайсан	1,5	1,7	2,1	3,5	4,2	3,9	3,8	3,3	3,1	2,7	2,0	1,6	2,8

Станция и область	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Кызылординская													
80. Саксаульская	3,1	3,3	3,5	3,5	3,3	3,3	3,1	2,9	2,7	3,0	2,8	2,9	3,1
81. Аральское море	4,8	5,2	5,3	5,3	5,0	5,0	4,9	4,6	4,4	4,8	4,7	4,7	4,9
82. Казалинск	3,3	3,8	3,8	3,8	3,4	2,9	2,8	2,6	2,5	2,8	2,9	3,2	3,2
83. Кызылорда	4,5	4,8	4,9	5,3	4,7	4,0	3,7	3,9	3,8	3,7	3,9	4,2	4,3
84. Уялы	5,0	5,1	5,3	5,4	5,2	5,0	5,1	5,1	4,9	5,2	5,2	5,1	5,1
Южно-Казахстанская													
85. Тасты	4,0	4,4	4,4	4,7	4,2	3,7	3,7	3,7	3,4	3,4	3,3	3,5	3,9
86. Ачисай	2,2	2,5	2,6	3,2	3,3	3,1	3,4	3,9	3,2	2,5	2,3	2,3	2,9
87. Туркестан	2,4	2,7	3,3	4,1	4,2	4,0	3,9	3,9	3,4	2,6	2,2	2,3	3,2
88. Кызылкум	2,2	2,6	3,0	3,6	3,7	3,8	4,0	3,9	3,0	2,3	2,0	1,9	3,0
89. Шымкент	2,6	2,7	3,0	3,2	3,2	2,8	2,8	2,8	2,4	2,2	2,2	2,3	2,7
Жамбылская													
90. Уланбель	3,5	3,9	3,9	4,3	3,7	3,3	3,2	3,3	3,1	3,0	2,9	3,2	3,4
91. Шокпар	5,7	5,9	5,7	5,6	4,9	4,7	4,6	5,0	4,9	4,7	5,3	5,5	5,2
92. Уюк	2,4	2,7	3,1	3,5	3,4	3,1	3,0	2,9	2,5	2,5	2,4	2,3	2,8
93. Курдай	6,3	6,4	6,5	6,6	5,4	4,3	4,5	5,5	5,6	5,3	5,6	6,0	5,7
94. Луговая	1,6	1,7	2,0	2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,8	1,8	1,7	1,6	1,9
95. Жамбыл	3,2	2,8	3,2	3,6	3,4	3,3	3,4	3,2	3,1	3,0	2,8	2,7	3,1

Станция и область	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Алматинская													
96. Учарал	2,7	3,0	3,4	4,2	3,8	3,4	3,1	3,0	3,0	3,3	3,2	3,0	3,3
97. Матай	2,2	2,5	2,9	3,5	3,3	3,2	3,0	2,9	2,8	2,8	2,6	2,2	2,8
98. Наймансуек	1,7	2,1	2,7	3,2	2,9	2,6	2,5	2,5	2,2	2,0	1,9	1,8	2,3
99. Жаланашколь	13,4	12,4	9,3	7,0	4,8	3,9	3,7	4,5	5,7	7,7	11	13,3	8,0
100. Сарканд	0,9	0,9	1,2	1,6	1,7	1,7	1,6	1,6	1,4	1,3	1,0	0,9	1,3
101. Талдыкорган	1,8	2,1	2,6	3,3	3,1	2,7	2,4	2,6	2,4	2,4	2,1	1,8	2,4
102. Кугалы	2,8	2,8	2,7	2,9	3,0	2,8	2,8	2,8	2,6	2,5	2,5	2,7	2,7
103. Панфилов	1,6	1,9	2,6	3,3	3,2	2,8	2,3	2,2	2,2	2,2	2,0	1,6	2,3
104. Куйган	2,1	2,5	2,9	3,4	3,5	3,1	2,9	3,0	2,8	2,8	2,5	2,3	2,8
105. Бакапас	1,7	2,0	2,6	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,4	2,2	2,1	1,8	2,5
106. Курты	2,8	2,8	3,0	3,3	3,3	3,3	3,3	3,2	2,7	2,7	2,7	2,6	3,0
107. Чилик	4,5	4,3	4,3	4,1	3,5	2,9	2,6	2,4	2,7	3,5	3,9	4,2	3,6
108. Подгорное	1,8	1,8	2,2	2,8	2,8	2,6	2,7	2,6	2,6	2,3	1,8	1,7	2,3
109. Алматы	1,0	1,1	1,3	1,7	1,8	2,0	1,9	1,9	1,8	1,5	1,1	1,0	1,5
110. Верхний Горелик	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	1,9	1,8	1,7	1,7	1,8
111. Усть-Горелик	1,5	1,6	1,6	1,7	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,6	1,6	1,7
112. Мынжилки	2,6	2,5	2,3	2,1	1,7	1,7	1,6	1,6	1,8	2,4	2,7	2,8	2,2
113. Б. Алматинское	1,8	1,7	1,8	1,5	1,5	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7	1,8	1,7	1,7

Данные таблиц показывают, что средняя скорость ветра имеет тенденцию уменьшения: с севера на юг – от 5 м/с до 2 м/с и с запада на восток – от 6 м/с до 3 м/с.

В зимние и осенние месяцы для северного, западного и восточного регионов среднемесячные скорости ветра значительно превышают соответствующие значения в летние месяцы, а также среднегодовое значение скорости ветра. Для южного региона республики отличительной особенностью является то, что средняя скорость ветра в летние месяцы превышает скорость ветра в зимние месяцы и его среднегодовое значение.

По среднегодовым скоростям ветра обычно принято судить о возможном количестве энергии ветра, протекающей в том или ином районе в течение года. Необходимо отметить, что среднегодовые скорости ветра, будучи одинаковыми для каких-либо районов, расположенных более или менее далеко друг от друга, могут давать совершенно различные количества энергии. Объясняется это тем, что среднегодовые скорости ветра – это среднеарифметические величины чисел в первой степени, в то время как энергия ветра пропорциональна сумме кубов этих чисел. Известно, что сумма кубов чисел, входящих в ряд, оказывается тем меньше, чем меньше разница в значениях этих чисел, имеющих первую степень и одинаковую сумму, т.е. чем более равномерен ряд.

На скорость ветра оказывают влияние наличие различных препятствий и характер подстилающей поверхности.

Часть воздушного потока при обтекании препятствий из прямолинейного движения переходит в беспорядочное, вихревое. Воздушные струи, непосредственно обтекающие края препятствий, срываются с них и закручиваются в вихри, которые уносятся в направлении воздушного потока. На месте унесенных появляются новые вихри и т.п. Это вихреобразование, происходя на гранях препятствия, постепенно затухает далеко за ним и совершенно прекращается на расстоянии, равном приблизительно пятнадцатикратной высоте препятствия.

Исследованиями в аэродинамической трубе установлено, что скорость воздушного потока при прохождении его над крышей дома значительно повышается; следовательно, анемометр, помещенный вблизи конька крыши здания, если последние стоят на совершенно открытом месте, будет давать для данного района преувеличенные значения скорости ветра. Скорость воздушного потока позади препятствия убывает не только на уровне самого препятствия, но даже на несколько большей высоте.

Подстилающая поверхность и рельеф местности также оказывают очень большое влияние на скорость ветра. Анеморазведками установлено, что на высоте 10-20 м в равнинной степи скорость ветра изменяется в зависимости от рельефа местности. Скорость ветра над вершинами открыто расположенных хребтов с правильными, хорошо обтекаемыми склонами, без резкого изменения рельефа, увеличивается в 1,5-2 раза. Если возвышенность не представляет правильного склона или рельеф искажен обрывом, оврагом и т.п., то скорость ветра обычно уменьшается.

Возвышенности с крутыми, обрывистыми, каменистыми склонами обусловливают весьма низкие скорости ветра; здесь решающее влияние имеют восходящие и нисходящие потоки.

Рельеф местности создает так называемые местные ветры. Если воздушный поток встречает отдельно стоящую вершину, то он при некоторых условиях может обойти ее, направляясь по долине, а не над ее гребнем. В случае движения ветра между двумя возвышенностями его скорость значительно возрастает. В долине образуется род коридора, в который с силой устремляется воздушный поток. Таким образом, создаются местные условия усиления скоростей ветра, достигающих иногда большой силы при сравнительно малых скоростях ветра на соседних открытых участках. Скорость ветра также повышается при обтекании холмов, имеющих более или менее правильное очертание поверхности.

Повторяемостью ветра называют сумму часов, в течение которых в каком-либо определенном пункте в разное время скорости ветра были одинаковыми.

Повторяемость является основной величиной, характеризующей ветер с энергетической стороны. Для ее определения различными авторами предлагаются свои выражения. У первых исследователей этого вопроса основным недостатком исследований о повторяемости ветров являлось отсутствие учета ряда местных условий: метеорологических, физико-географических и др., влияющих на структуру ветра.

В настоящее время наиболее просто повторяемость различных скоростей ветра можно определить, используя выражения Вейбулла для распределения.

Различные препятствия на земной поверхности сильно влияют на скорость и направление воздушных течений. Это влияние по мере увеличения высоты над земной поверхностью уменьшается, и на некоторой высоте оно почти пропадает.

Проведенные исследования показали, что течение воздушных потоков в верхних слоях атмосферы происходит с меньшими пульсациями, чем внизу, вблизи земной поверхности. Наблюдения изменений скорости ветра с высотой над различными видами подстилающей поверхности показывают, что наибольшее снижение скорости ветра близ поверхности земли вызывается городской застройкой, хотя бы и на равнине. Когда же подстилающей поверхностью является открытая равнина, замечается снижение скорости ветра вблизи поверхности Земли. Меньший градиент снижения скорости ветра наблюдается над выпуклой поверхностью с плавными очертаниями рельефа; здесь наблюдается даже некоторое повышение скорости ветра близ поверхности.

В низких слоях от земной поверхности и до 500 м наблюдается резкое повышение скорости ветра по мере удаления от земной поверхности. Сравнение хода скоростей в зимнее и летнее время показывает, что изменение скорости ветра с высотой летом значительно меньше, чем

зимой. Это можно объяснить меньшими значениями вертикального температурного градиента в зимнее время сравнительно с летним временем.

Д. Лайхтманом, с учетом влияния подстилающей поверхности на скорость ветра, а также турбулентности потока вблизи поверхности Земли и с допущением, что на некоторой высоте h_0 скорость ветра $V = 0$, получена следующая формула:

$$V = V_1 \frac{\ln h/h_0}{\ln h_1/h_0},$$

где V – скорость ветра на высоте h; V_1 – известная скорость ветра на высоте h_1; h_0 – высота, на которой скорость ветра в месте измерения равна нулю.

Обычно h_0 рассматривается как мера шероховатости подстилающей поверхности; ее величина равна 7 см – свекловичное поле, 3 см – поле с низкой травой, 0,5 см – снежный покров.

Ветры нижних слоев следуют рельефу местности. Встречающиеся при этом неровности вызывают вихри, неблагоприятные для работы ветродвигателей. Неустойчивость ветра как по скорости, так и по направлению простирается в высоту около 80 м над землей.

ГЛАВА 9. СИСТЕМЫ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

9.1. Классификация ветродвигателей по принципу их работы

Классификация ВЭУ в разных литературных источниках осуществляется по различным признакам или их сочетаниям, например, по мощности, расположению оси вращения, количеству лопастей, системам передачи мощности, способам управления моментом и мощностью, быстроходности, режимам работы и т. д.

Одним из вариантов классификации, оказывающей значительное влияние на выбор генераторов, является классификация в зависимости от мощности ВЭУ относительно полной мощности энергосистемы, к которой они подключены. В этом случае ВЭУ подразделяются на три класса (А, В и С). Эти классы представлены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Классы ветроэнергетических систем

Класс	Мощность ВЭУ	Степень автономности ВЭУ	Способы управления
А	$P>>P_G$	Автономная	а) шагом ветроколеса; б) нагрузкой
В	$P \approx P_G$	Ветродизельная	а) раздельная работа ВЭУ и дизель-генератора; б)совместная работа ВЭУ и дизель-генератора
С	$P<<P_G$	Подключенная к мощной энергосистеме	а) параметрами генератора постоянного тока; б) преобразованием постоянного тока в переменный; в) изменением коэффициента скольжения

ПРИМЕЧАНИЕ. P – мощность ВЭУ; P_G – мощность других генераторов систем

Класс А: мощность ветроэлектрогенератора в энергосистеме является определяющей, т.е. $P \geq 5P_G$.

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

Эффективность работы ветроустановки и ее стоимость во многом зависят от правильности выбора системы управления генератором. При минимальном управлении генератором напряжение на его выходе (и частота – в случае с генератором переменного тока) будет нестабильным. Электроэнергию с такими параметрами можно непосредственно применять в нагревательных элементах, а также в выпрямителях для последующего использования. Во многих случаях такие ветроустановки вполне удовлетворяют потребности потребителей. Относительно небольшие потребности в электроэнергии со стабилизированными параметрами (например, 240 В/50 Гц или 110 В/60 Гц) можно в этом случае удовлетворить специальными преобразователями, питаемыми от аккумуляторных батарей. Преобразуемая таким способом энергия ограничивается лишь стоимостью аккумуляторных батарей и преобразователей.

В некоторых случаях желательно стабилизировать частоту всей вырабатываемой генератором электроэнергии. Для этого существуют два совершенно различных способа.

Механическое управление лопастями ветроколеса с целью стабилизации частоты его вращения. При таком управлении шаг лопастей ветроколеса при изменении скорости ветра изменяется так, чтобы частота его враще-

ния оставалась постоянной. Недостатком метода являются большие потери энергии ветрового потока, сложность и невысокая надежность.

Электрическое управление, при котором постоянство частоты вращения ветроколеса и генератора обеспечивается изменением электрической нагрузки на выходе генератора. При таком способе стабилизации частоты энергия ветра используется гораздо эффективнее, так как лопасти ветроколеса работают в оптимальном режиме. Использование современного электронного оборудования делает его также более дешевым и надежным по сравнению с механическим управлением.

В автономных ВЭУ используются электрогенераторы разных типов. В небольших установках наиболее распространены многополюсные генераторы с постоянными магнитами. Генераторы постоянного тока могут иметь устройства для сглаживания пульсаций тока, а ток можно использовать для зарядки аккумуляторных батарей. Для генерации переменного тока можно применять синхронные генераторы с нестабилизированными и стабилизированными параметрами на выходе. Асинхронные генераторы переменного тока могут быть как с самовозбуждением, так и со вспомогательным возбуждающим генератором.

Класс В: мощность ветроэлектрогенератора – одного порядка с мощностью других генераторов системы, т.е. $P \approx P_G$.

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

В ветроустановках этого класса используются две различные схемы распределения вырабатываемой энергии.

1. *Одноканальная схема.* В такой схеме, имеющей один выход (обычно трехфазный, бытовые потребители

питаются от какой-то одной фазы), поддерживается стабилизированное напряжение определенной величины (в зависимости от потребностей потребителя). Круглосуточное снабжение электроэнергией без учета ее потребления требует длительной работы (как правило, не менее полусуток) дизельного генератора в периоды безветрия. Дизель при этом или работает непрерывно (особенно для освещения), или выключается только при очень сильном ветре. На практике в такой схеме при сильном ветре иногда более 70% энергии аэрогенератора гасится на балластных сопротивлениях.

Многоканальная схема. Целью этой схемы с несколькими выходами является максимально полное использование ветровой энергии. Это достигается снижением цены электроэнергии для определенных потребителей в зависимости от ее качества. При слабом ветре потребители дешевой электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, автоматически отключаются, уменьшая этим нагрузку на энергосистему. Частоту вращения ветроэлектрогенератора в такой системе можно также регулировать одним из описанных выше способов, и тогда он также будет источником стабилизированной электроэнергии. В периоды безветрия электроэнергией снабжаются только потребители дорогостоящей стабилизированной энергии, вырабатываемой дизельным электрогенератором. Преимуществом такой схемы распределения энергии является максимальное использование в любой момент времени энергии ветра.

Класс С: ветроэлектрогенератор подключен к энергосистеме, значительно более мощной, чем его собственная мощность, т.е. $5P<P_G$.

Это наиболее распространенный случай работы ветроэлектрогенератора любой мощности в районах, где имеются коммунальные или другие энергосистемы большой мощности. При этом энергия ВЭУ используется непосредственно, а ее излишки подаются в энергосистему. При слабом ветре и в безветрие потребители снабжаются электроэнергией от энергосистемы. Наиболее дешевым и безопасным типом ветроэлектрогенератора в этом слу-

чае является асинхронный генератор переменного тока, подключенный непосредственно в энергосистему. При этом частота вращения ветроколеса может не более чем на 10% превышать частоту, соответствующую номинальной частоте электросети. При слабом ветре, чтобы исключить работу ВЭУ в режиме электродвигателя, его отключают от сети. Необходимость стабилизации частоты вращения ветроколеса при прямом включении аэрогенератора в сеть не позволяет поддерживать постоянную быстроходность ветроколеса, т.е. снижает его КПД. В небольших ВЭУ поэтому часто устанавливают два ВЭУ различной мощности, например, 5 и 22 кВт, автоматически включающиеся, соответственно, при слабом и сильном ветре. Используются и другие приемы, позволяющие изменять частоту вырабатываемой генератором электроэнергии, а именно:

- увеличение числа полюсов генератора за счет перекоммутации его обмоток при падении частоты вращения ветроколеса;
- выпрямление переменного тока ВЭУ и затем преобразование его в переменный ток с заданными стабилизированными параметрами;
- увеличение допустимого отклонения частоты вращения ветроколеса от номинальной – за счет включения активной нагрузки на обмотку асинхронного генератора.

По технологическому назначению и виду получаемой от ветроустановки энергии они подразделяются на ветроэлектрические (ВЭУ) и ветромеханические (ВМУ).

Ветромеханические установки, как правило, имеют небольшую мощность и преобразованную энергию ветрового потока передают непосредственно на исполнительный орган или рабочую машину.

Ветроэлектрические установки предназначены для выработки электрической энергии и номинальная мощность таких установок лежит в пределах от нескольких сот ватт до 2-3 МВт.

Ветроэлектрические установки также могут быть системными, т.е. предназначенными для параллельной

работы с энергосистемами, автономными и комбинированными.

Автономные установки не связаны с энергосистемами и предназначены для выдачи электрической энергии только на связанные с ними объекты. Как правило, мощность автономных ветроэлектрических установок не превышает 100 кВт. Необходимо отметить, что возможность параллельной работы с энергосистемами определяется не только номинальной мощностью ветроустановки, но также наличием соответствующей аппаратуры для управления работой установки и преобразования параметров вырабатываемой электроэнергии.

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

Первый класс включает ветродвигатели, у которых ветроколесо располагается в вертикальной плоскости: при этом плоскость вращения перпендикулярна направлению ветра и, следовательно, ось ветроколеса параллельна ветровому потоку. Такие ветродвигатели называются крыльчатыми. У некоторых крыльчатых ветродвигателей ось ветроколеса имеет наклон от 60 до 80 относительно горизонтальной плоскости по конструктивным соображениям.

Второй класс включает системы ветродвигателей с вертикальной осью вращения ветрового колеса. По конструктивной схеме они разбиваются на две группы:

– карусельные ветродвигатели, у которых нерабочие лопасти либо прикрываются ширмой, либо располагаются ребром против ветра;

– роторные ветродвигатели системы Савониуса.

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

Быстроходностью называется отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра, вычисляемое:

$$Z = \frac{wR}{V}.$$

Оптимальное значение быстроходности ветроколеса зависит от числа лопастей. Например, оптимальное значение быстроходности двухлопастного колеса лежит в пределах 5-7, трехлопастного – 4-5, шестилопастного – 2,5-3,5. На рис. 9.2 представлены типовые зависимости коэффициента использования энергии ветрового потока от быстроходности ветроколеса.

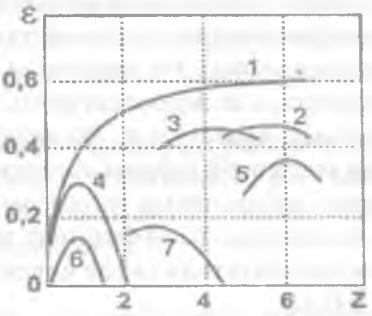


Рисунок 9.2. *Типовые зависимости коэффициента использования энергии ветрового потока от быстроходности ветроколеса:*
1 – идеальное крыльчатое ветроколесо; 2, 3, 4 – двух-, трех- и многолопастные ветроколеса; 5 – ротор Дарье; 6 – ротор савониуса; 7 – четырехлопастное ветроколесо датской мельницы

Согласно приведенным зависимостям, получается три достаточно резко выраженные области: для $Z < 1,5$; $2 < Z < 3,5$ и $Z > 3,5$.

К первой группе ($1,5 < Z < 3,5$) относят ветродвигатели, которые используют силовые свойства ветрового потока. Это барабанные и парусные установки. Как правило, такие двигатели тихоходны, а коэффициент использования энергии ветра не превышает 0,10-0,15.

Ветродвигатели *второй группы* используют скоростные свойства ветрового потока ($Z > 3,5$). Движущий мо-

мент ветродвигателя образуется за счет подъемной силы, действующей на лопасти крыльчатого типа. Максимальный теоретический коэффициент использования энергии ветра крыльчатой ветроустановки приближается к 0,6, а коэффициент передачи мощности – к 0,48. Помимо широко известных пропеллерных, к этому классу относят роторные ветродвигатели с вертикальной осью вращения типа Дарье. Ветродвигатели типа Дарье считаются перспективными, хотя они обычно не имеют самозапуска и начинают работать при скорости ветра свыше 4,5 м/с.

К третьей группе относят ветродвигатели, в которых используют одновременно как силовые, так и скоростные свойства ветрового потока. Это двигатели типа Савониуса и Дарье-Савониуса, где ветродвигатель типа Савониуса служит пусковым двигателем. Коэффициент использования энергии ветра этой группы достигает 0,39. К этой же группе относят крыльчатые ветродвигатели с вертикальной осью вращения. Коэффициент использования энергии ветра ветродвигателя такой конструкции лежит в пределах 0,13-0,45.

Таким образом, можно заключить, что чем меньше количество лопастей у ветроколеса, тем выше его быстроходность и соответственно большее значение коэффициента использования энергии ветрового потока.

В настоящее время проводятся исследования по повышению эффективности использования ветродвигателей с помощью диффузоров (увеличение эффективности на 30-60%); по созданию принципиально новых конструкций, таких как конусные крыльчатые ветротурбины, по снижению стоимости и улучшению их эксплуатационных качеств, автоматизации режимов работы.

Ветроэлектрические установки по значению единичной мощности подразделяются на установки малой мощности с Рн до 20 кВт, средние – с Рн от 20 до 300 кВт, большой – с Рн свыше 300 кВт. В некоторых работах рекомендуется ветроэлектрические установки по мощности подразделять на: мини – с Рн до 1 кВт, малой – с Рн до 100 кВт, средней – с Рн до 1 МВт и крупной – Рн свыше 1 МВт.

Зависимость мощности ветрового потока от высоты башни и диаметра ветроколеса для крыльчатой ветроэнергетической установки приведена на рис. 9.3, а на рис. 9.4 – аналогичная зависимость для ветроэнергетических установок с ротором Дарье.

Ветроэлектрические установки малой мощности могут быть использованы для зарядки аккумуляторных батарей, питания сигнальных огней, освещения малых изолированных объектов и т.д. Кроме ветроэлектрических установок, предназначенных для выработки электроэнергии, также выпускаются ветромеханические установки для подъема и подачи воды, где вместо генераторов электрической энергии используются различные насосы.

Установка ветроколеса в ветроэлектрической установке малой мощности, в зависимости от направления ветра, производится при помощи специально выполненного хвоста или виндроза.

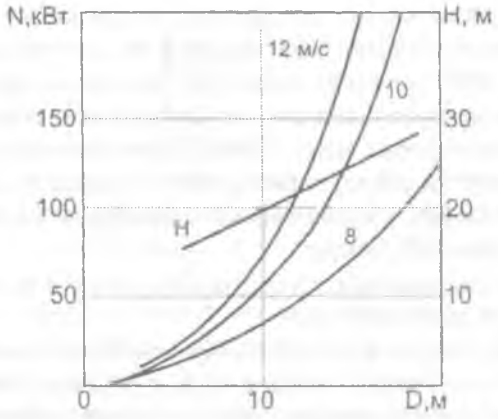


Рисунок 9.3. *Зависимость мощности ветрового потока N от высоты башни H и диаметра ветроколеса D для крыльчатой ВЭУ*

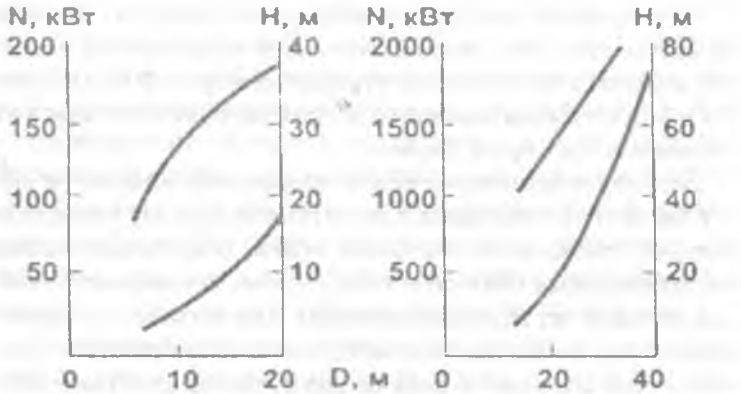


Рисунок 9.4. *Зависимость мощности ветрового потока N от высоты башни H и диаметра ветроколеса D для ВЭУ с ротором Дарье*

9.2. Конструкция ветроустановок

Наибольший прогресс в конструировании, производстве и эксплуатации ВЭУ средней мощности достигнут в Дании. ВЭУ средней мощности датского производства эксплуатируются или же планируются к строительству во многих странах мира. Необходимо отметить, что преимущественно выпускаются ВЭУ с единичной мощностью 45-55 кВт, ветроколесами диаметром 14-16 м и башнями высотой 18-20 м.

Основными в конструкции ВЭУ этого класса являются следующие элементы.

На фундаменте устанавливается башня высотой в несколько десятков метров, которая обычно выполняется в виде конической трубы, состоящей из нескольких секций длиной 6-8 м. На верхней части башни на поворотной платформе смонтирована головка ВЭУ, в которой установлены основные механизмы: вал ветроколеса со ступицей, несущие лопасти, редуктор, генератор электрической энергии, механизмы установки на ветер и механизмы управления и безопасности.

Следовательно, основными элементами ветроустановок являются:

- ветроколесо (лопасти, установленные в ступице);
- поворотная платформа (гондола), в которой размещаются вал ветроколеса, редуктор, генератор электрической энергии, механизмы установки на ветер и механизмы управления и безопасности;
- башня.

Внешний вид распространенных крыльчатых ветроустановок приведен на рис. 9.5.

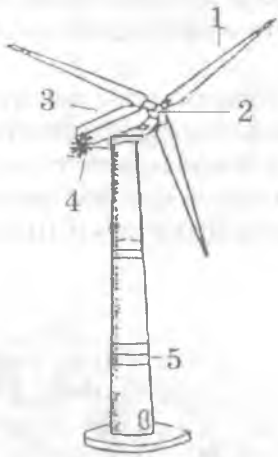


Рисунок 9.5. *Внешний вид крыльчатой ветроустановки: 1– лопасти ветроколеса; 2– ступица; 3 – поворотная гондола с оборудованием; 4 – виндроза; 5 – башня*

Лопасти ветродвигателя изготовляются из особо прочных и легких материалов и имеют очень сложный аэродинамический профиль. В некоторых конструкциях на каждой лопасти имеется тормозной поворотный конец.

Отдельные ВЭУ имеют генераторы электрической энергии с двумя обмотками, каждая из которых включается на определенную скорость ветра.

В ВЭУ лучшие результаты дает использование турбин с переменной частотой вращения по сравнению с постоянной. При этом обеспечивается лучшее использование

энергии ветра при малых скоростях; большая производительность, благодаря отсутствию непосредственной связи частоты ротора и энергии, отдаваемой в электрическую сеть; кроме того, уменьшаются механические нагрузки на привод, опору ВЭУ и фундамент и, следовательно, снижается стоимость ВЭУ; ротор с переменной частотой вращения производит меньший шум, чем ротор с постоянной частотой вращения.

Установки подключаются к электрической сети при помощи тиристоров и имеют надежную микропроцессорную систему контроля и управления, что обеспечивает высокую надежность и эффективность и больший срок службы.

На рис. 9.6-9.8 представлены конструкция и компоновка основного энергетического оборудования некоторых ВЭУ. На рис. 9.9 приведены типы и внешний вид ВЭУ, используемых самой крупной энергетической компанией в мире – «Altamont Pass» (США).

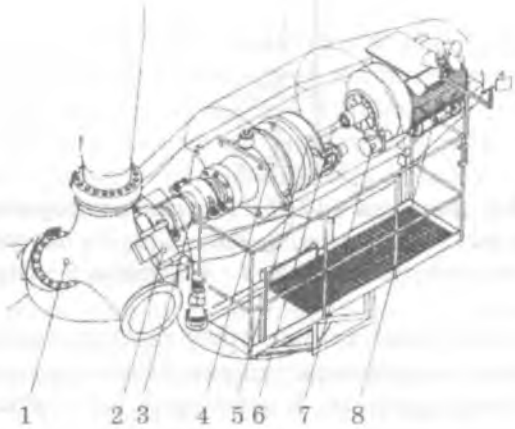


Рисунок 9.6. *Конструкция ВЭУ типа «NORD TANK»: 1 – ступица ветроколеса; 2 – гидропривод для тормоза ветроколеса; 3 – главный вал в сборке (вал тормоза и кожух вала); 4 – зубчатая передача; 5 – дисковый тормоз; 6 – вал трансмиссии; 7 – гидропривод для расцепления тормоза; 8 – генератор*

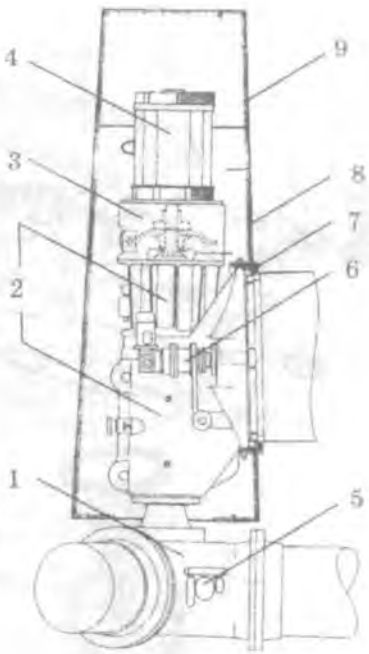


Рисунок 9.7. *Конструкция ВЭУ типа «VESTAS DANISH WIND POWER A/S»*
1 – ступица ветроколеса; 2 – шестеренчатая передача и главный вал; 3 – тормозная система; 4 – генератор; 5 – гидравлическая система для торможения ветроколеса; 6 – коробка передач для поворота гондолы; 7 – подшипники системы поворота гондолы; 8 – шток; 9 – защита от шума

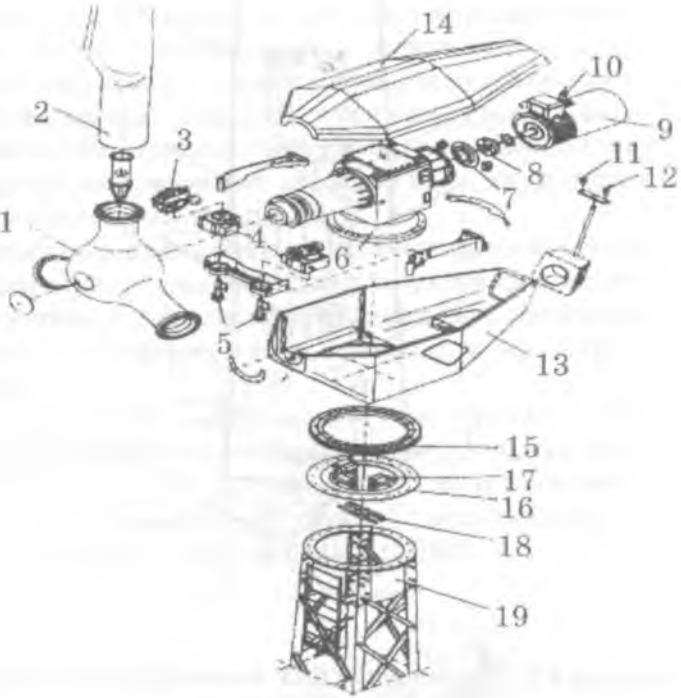


Рисунок 9.8. *Компоновка основного энергетического оборудования в гондоле ВЭУ типа «ГЮРЗА»: 1 – ступица; 2 – лопасти; 3 – гидроусилитель (гидропривод); 4 – механизм поворота лопастей; 5 – шестеренки для поворота лопастей; 6 – главная коробка передач (редуктор); 7 – дисковый тормоз; 8 – муфта генератора; 9 – генератор; 10 – датчик вибрационный; 11 – анемометр; 12 – ветровой флюгер (стабилизатор); 13 – гондола ветродвигателя, основание кожуха; 14 – гондола ветродвигателя, крышка кожуха; 15 – шарикоподшипник для поворота гондолы; 16 – дисковый тормоз поворота гондолы; 17 – внутренний тормоз поворота гондолы; 18 – разгрузочный кабель; 19 – башня ВЭУ*

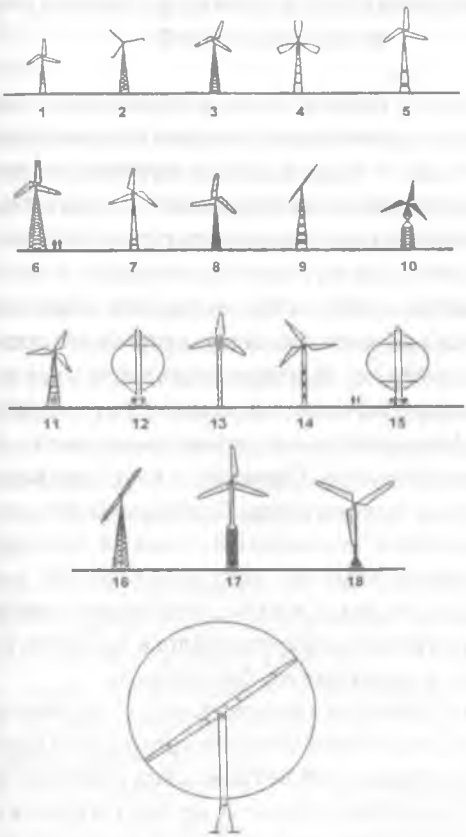


Рисунок 9.9. *Ветроэнергетические установки компании «Altamont Pass»:*
1 – Fayette (56-96 кВт); 2 – Storm Master (40 кВт); 3 – Enertech (40 кВт); 4 – Windmatic (65 кВт); 5 – Bonus (65 кВт); 6 – Vestas (65 кВт); 7 – Nicon (60 кВт); 8 – Nordtank (65 кВт); 9 – ESI-54 (50-85 кВт); 10 – US Windpower (50-100 кВт); 11 – Poltnko (100 кВт); 12 – Flowind (170 кВт); 13 – Fayette (400 кВт); 14 – Windmaster (75-200 кВт); 15 – Flowind (265 кВт); 16 – ESI-80 (250 кВт); 17 – Danish Wind Technologi (340 кВт); 18 – Howden (330 кВт); 19 – PG and Boeing MOD-2 (2500 кВт) (масштаб один и тот же для всех ВЭУ)

9.3. Преимущества и недостатки различных систем ветродвигателей

Ветродвигатели карусельные и барабанные (второго и третьего классов) отличаются весьма простой схемой работы ветроколеса. У карусельных ветродвигателей воздушный поток, набегая на ветроколесо, давит на лопасти с одной стороны оси вращения; с другой же стороны он встречает либо ширму, прикрывающую лопасти, идущие против ветра, либо ребра лопастей, если они поворотные, вследствие чего давление потока на них оказывается весьма малым. В результате получается сила в плоскости вращения, которая создает крутящий момент ветроколеса. Аналогичное явление имеет место и у барабанных ветродвигателей. Однако у карусельных положение ветроколеса в потоке ветра более выгодно: оно всегда находится в рабочем положении, с какой бы стороны ни дул ветер. У барабанных же ветродвигателей, равно как и у крыльчатых (первый класс), требуется специальное устройство для установки ветроколеса на ветер при каждом изменении направления последнего.

Основные недостатки карусельных и барабанных ветродвигателей определяются самим принципом расположения рабочих поверхностей ветроколеса в потоке ветра.

1. Так как рабочие лопасти колеса перемещаются в направлении воздушного потока, то ветровая нагрузка действует не одновременно на все лопасти, а поочередно.

Периодически лопасти затеняют друг друга почти на половине окружности, и каждая из лопастей только в одном положении воспринимает полный поток и может развивать максимальную мощность. Кроме того, когда лопасти прикрыты ширмой или направлены ребром к ветру, они развивают хотя и малый по величине, но все же отрицательный момент.

Вращающий момент ветроколеса получается равным разности моментов сил, действующих диаметрально противоположно лопасти. В результате коэффициент использования энергии ветра получается весьма низким и

при самых благоприятных условиях не превышает величины 0,10, что установлено экспериментальными исследованиями.

Коэффициент использования энергии ветра карусельными ветродвигателями можно повысить путем усовершенствования поверхностей и комбинацией положения их в потоке ветра. Однако при конструктивном оформлении такой ветродвигатель получается сложнее крыльчатого.

2. Движение поверхностей ветроколеса в направлении ветра не позволяет развивать большую скорость вращения, так как поверхности не могут двигаться быстрее ветра.

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

У роторных ветродвигателей ветроколесо также вращается в горизонтальной плоскости, но протекание потока через ометаемую поверхность происходит совершенно иначе, чем у карусельного и барабанного ветродвигателей. В данном случае ветроколесо создает меньший подпор воздушного потока.

Поток ветра скользит по выпуклой поверхности и действует полной силой на изогнутую поверхность, огибает ее, создавая на поверхности дополнительную силу, вращающую ротор. Тех сопротивлений, которые имели место у карусельных ветродвигателей, в данном случае нет. Поэтому и коэффициент использования энергии ветра ветродвигателей системы Савониуса примерно в два раза выше, чем у карусельных. Продувками модели ротора Савониуса в аэродинамической трубе определен наибольший коэффициент использования энергии ветра $\varepsilon = 0{,}18$.

Крыльчатые ветродвигатели в значительной мере свободны от перечисленных выше недостатков карусельных и барабанных ветродвигателей, что подтверждается теоретическими расчетами и практическими данными.

9.4. Методика определения параметров ветроустановок

Предлагаемая методика выбора технических характеристик ветроустановок предусматривает выполнение следующих пунктов:

а) статистическая обработка метеоданных о средних скоростях ветра с использованием в качестве исходной информации данных метеонаблюдений, статистических данных метеорологических ежемесячников или же экспериментальных данных;

б) расчет значений удельной мощности ветрового потока;

в) определение времени наблюдения по градациям скоростей ветра;

г) расчет годовых и месячных значений удельной энергии ветрового потока;

д) определение расчетного значения скорости ветроустановки;

е) определение возможной номинальной мощности, диаметра ветроколеса и высоты башни ВЭУ;

ж) выбор соответственно полученным результатам ветроустановки по каталогам;

и) расчет возможного годового производства электрической энергии ветроустановкой в соответствии с ее номинальными техническими параметрами и энергетическими характеристиками местного потока.

Расчетная мощность ветроэлектрических установок определяется выражением, кВт:

$$P_p = 0{,}48 \cdot 10^{-3} \cdot D^2 \cdot \nu^3{}_p \cdot \varepsilon \cdot \eta_\Gamma \cdot \eta_\Pi . \qquad (9.1)$$

Ветроэнергетические установки преобразуют в электрическую энергию только часть кинетической энергии ветрового потока. Степень преобразования зависит от технических характеристик ветроэнергетических установок и, в частности, от численного значения коэффициента использования энергии ветра, а также от коэффициентов полезного действия передачи и генератора электрической энергии.

Значение коэффициента использования энергии ветра определяется для конкретных ветроэнергетических установок по аэродинамической характеристике ветродвигателя. В зависимости от технического совершенства коэффициента использования энергия ветра лежит в пределах от 0,20 до 0,45.

Мощность, которую можно получить от генератора электрической энергии в зависимости от скорости ветра, можно представить в виде:

$$P_{эл.} = \begin{cases} 0 \\ \eta_{ЭГ} \cdot 1/2 \varepsilon v^3 A \\ P_{ном} \\ 0 \end{cases} \quad при \quad \begin{cases} v < v_{min} \\ v_{min} \le v \le v_{н.р} \\ v_{н.р} \le v_{max} \\ v > v_{max} \end{cases}$$

Направление ветра необходимо учитывать при сооружении многоагрегатных ветроэнергетических станций (ВЭС). Для одиночных ветроэнергетических установок это условие необязательно.

Возможное годовое производство электрической энергии определено выражением:

$$W_{год} = \sum_{n}^{m} P_i t_i + \sum_{k}^{i} P_н t_i, \qquad (9.2)$$

где (n , m) – градации скорости ветра, меньше расчетной и находящейся в пределах $v_{на} < v < v_p$;

P_i – мощность ветрового потока, соответствующая скорости ветра v_i, меньше расчетной;

t_i – время, соответствующее скоростям ветра, находящимся в пределах $v_p \le v < v_{max}$;

(k ,1) – градация скоростей ветра, соответствующая отношению $v_p \le v < v_{max}$;

$P_н$ – расчетная или номинальная мощность.

Одним из основных параметров ветроустановок следует считать численные значения начальной, расчетной и максимальной скоростей ветра. Начальная скорость определяет скорость ветра, при которой ветроустановка на-

чинает вырабатывать электрическую энергию, а максимальная скорость – скорость, при которой заканчивается процесс выработки электрической энергии. Скорость ветра является определяющим параметром, который прямо влияет на мощность и производство электроэнергии ветроустановками.

Рассмотрим метод определения расчетной скорости ветрового потока, при которой происходит отдача номинальной мощности.

Расчетную скорость ветроустановки можно определить, исходя из следующих условий:

1) получение максимального значения вырабатываемой энергии;

2) максимальное время работы в течение года или другого промежутка времени с возможностью максимального использования установленной мощности.

Необходимо отметить, что если решен вопрос с аккумулированием вырабатываемой энергии, то критерием определения расчетной скорости ветроэлектрических установок следует считать получение максимума энергии. При отсутствии достаточно надежного аккумулятора вырабатываемой энергии расчетная скорость ветроустановки должна быть согласована со временем протекания технологических процессов, требуемой мощностью и энергией, а также с номинальной мощностью ветроэлектрической установки.

Для определения расчетной скорости ветра ветроустановки необходимо взять первую производную от удельного годового производства электрической энергии ветроустановкой и приравнять ее нулю:

$$\frac{dW_{\text{уд.год}}}{dv} = 0 \qquad (9.3)$$

Удельное годовое производство электрической энергии определяется согласно выражению:

$$W_{уд.\,год} = \int_{v_{min}}^{v_r} \rho \cdot \varepsilon \cdot \eta_1 \cdot \eta_n \cdot v_i^3 / 2 \cdot t_{jv} dv + \int_{v_r}^{v_{max}} \rho \cdot \varepsilon \cdot \eta_r \cdot \eta_n \cdot v_p^3 / 2 \cdot t_{jv} dv =$$

$$= \rho \cdot \varepsilon \cdot \eta_r \cdot \eta_n / 2 \left(\int_{v_{min}}^{v_r} v_p^3 \cdot t_{jv} + \int_{v_r}^{v_{max}} v_p^3 \cdot t_{jv} dv \right). \qquad (9.4)$$

где v_p – расчетная скорость ветра;

v_{min} – начальная скорость ветра;

ε – коэффициент использования энергии ветра;

$\eta_г$ – КПД генератора;

$\eta_п$ – КПД передачи.

Величины, стоящие под знаком интегралов, недифференцируемы. Для нахождения максимума функции $W_{уд.год}$ необходимо применить метод графического определения экстремума функций.

Скорость ветра, соответствующая максимуму зависимости $W_{уд.год} = f(v_p/v_{min})$, будет определять численное значение расчетной скорости ветра, при которой будет происходить максимум выработки электроэнергии.

9.5. Основы теории использования энергии ветра

Воздушный поток, как и всякое движущееся тело, обладает кинетической энергией. Одним из видов использования кинетической энергии является превращение ее в механическую работу.

Кинетическая энергия $E_в$ воздушного потока, имеющего скорость v, определяется по выражению:

$$E_в = \frac{mv^2}{2}, \qquad (9.5)$$

где m – масса движущегося воздушного потока;

$$m = \rho V = \rho v F, \qquad (9.6)$$

где V – объем массы воздуха, протекающего за секунду через сечение F со скоростью v.

Количество энергии ветра, протекающего за 1 с через поперечное сечение:

$$E_{в} = \rho \frac{vF}{2}, \qquad (9.7)$$

Энергия ветра изменяется пропорционально кубу, его скорости и поперечному сечению.

Отличительным свойством ветра является его повсеместность. Однако техническое использование энергии ветра во многих случаях крайне затруднено из-за низкой плотности воздуха (она в 800 раз меньше плотности воды). Для получения значительной мощности необходимо ветроколесо очень больших размеров, т.к. ветроагрегат может преобразовать только часть потенциальной энергии, определяемой коэффициентом использования энергии ветра. При этом частота вращения ветроколеса должна регулироваться из-за непостоянства скорости ветра во времени, и вырабатываемая мощность, изменяясь пропорционально третьей степени скорости ветра, будет иметь большую амплитуду колебаний.

Мощность, развиваемая ветроколесом, определяется как кинетическая энергия ветра, действующая за единицу времени, с учетом коэффициента ее использования, Вт:

$$P_{вк} = \rho \frac{A}{2} v 3\zeta, \qquad (9.8)$$

где ζ – коэффициент использования энергии ветра.

Поверхность, ометаемая крыльями ветроколеса:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0{,}785 D^2,$$

где D – диаметр ветроколеса.

При плотности воздуха r=1,23 кг/м^3 мощность, развиваемую ветроколесом, можно определить по выражению, кВт:

$$P_{вк} = 4.81 \cdot 10^{-4} v^3 D^2 \xi. \qquad (9.9)$$

мощность, развиваемая с единицы ометаемой площади, кВт/м^2.

$$P_{вкл} = 0{,}615 \cdot 10^{-3} v^3 \xi, \qquad (9.10)$$

Таким образом, мощность, развиваемая ветроколесом, определяется ометаемой площадью ветроколеса, скоростью ветра и величиной коэффициента использования энергии ветра.

9.6. Коэффициент использования энергии ветра

Ветроколесо преобразует в механическую энергию только часть полной энергии потока. Воздушный поток при прохождении через поперечное сечение, ометаемое ветроколесом, имеет приблизительно форму, показанную на рис. 9.10.

Скорость воздушного потока снижается по мере приближения его к ветроколесу и на некотором расстоянии за ним. По классической теории, полные потери скорости воздушного потока за ветроколесом в два раза больше, чем потери в плоскости вращения ветроколеса. Вместе с тем давление воздуха по мере приближения к ветроколесу повышается, а за ним оно резко падает, вследствие чего за колесом образуется некоторое разрежение.

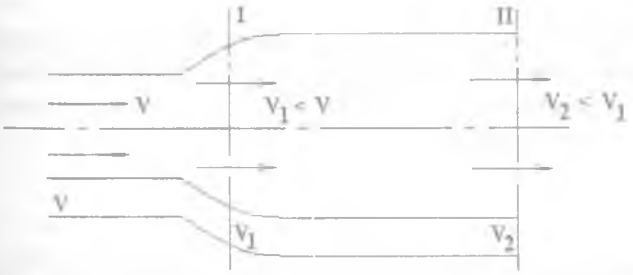


Рисунок 9.10. *Изменение скорости ветра в плоскости вращения ветроколеса (I) и за ним (II):*
1 – скорость в плоскости вращения ветроколеса;
2 – то же, но за ним

Энергия, затраченная на вращение ветроколеса, равна разности кинетической энергии ветра перед ветроколесом и за ним:

$$E_{вк} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2} = \frac{m}{2}(v^2 - v_2^2), \tag{9.11}$$

где v^2 – скорость воздушного потока за ветроколесом.

С другой стороны, воспринятую ветроколесом энергию можно выразить как произведение силы давления ветра G на скорость потока в плоскости ветроколеса:

$$E_{вк} = Gv_1, \tag{9.12}$$

Отношение энергии, воспринятой ветроколесом, к полной энергии, которой обладает воздушный поток, называется коэффициентом использования энергии ветра:

$$\xi = E_{вк}/E_в \tag{9.13}$$

Коэффициент использования энергии ветра зависит от величины потери скорости ветра при прохождении его через плоскость ветроколеса. Согласно классической теории ветроколеса:

$$\xi = 4\frac{v_1}{v}\left(1 - \frac{v_1}{v}\right)^2. \tag{9.14}$$

Н.Е.Жуковский для идеального ветроколеса установил максимальную величину коэффициента использования энергии ветра: $x = 0{,}593$. Этот предел может быть получен при условии:

$$\frac{v_1}{v} = \frac{1}{3},$$

т.е. идеальное ветроколесо должно работать так, чтобы потери скорости ветра в плоскости его вращения составляли 1/3 от поступающей величины.

В действительности ξ_{max} значительно меньше, и, согласно теории реального ветроколеса, разработанной

Г.Х.Сабининым, у лучших быстроходных ветроколес максимальная величина коэффициента $\xi_{max} = 0{,}45–0{,}48$, у тихоходных – 0,35–0,38. Данный коэффициент в основном зависит от аэродинамических характеристик ветроколеса.

9.7. Аэродинамические характеристики ветроагрегатов

Параметры различных ветроагрегатов удобно сопоставлять при помощи аэродинамических характеристик, которые показывают, как изменяются крутящий момент и коэффициент использования энергии ветра в зависимости от быстроходности ветроколеса. Необходимые данные для построения аэродинамических характеристик получают либо расчетом, либо экспериментально – путем продувки модели ветроколеса в аэродинамической трубе. По полученным данным строят график, примерный вид которого показан на рис. 9.11.

По оси абсцисс откладывают значения быстроходности Z ветроколеса, которые выражаются отношением окружной скорости конца лопасти к скорости ветра:

$$Z = \frac{\omega R}{v} = \frac{\pi n}{30}\frac{R}{v}, \qquad (9.15)$$

где ω – угловая скорость, рад/с; R – радиус ветроколеса, м.

$$\overline{M} = \frac{2M}{\eta R \rho v^2}, \qquad (9.16)$$

где M – момент, развиваемый ветроколесом.

Коэффициент использования энергии ветра определяется по выражению:

$$\xi = \frac{2DM\omega}{\pi R^2 \rho v^3}, \qquad (9.17)$$

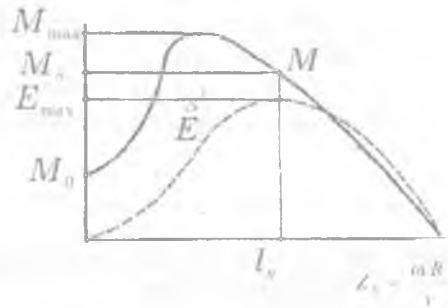


Рисунок 9.11. *Аэродинамические характеристики ветроколеса:*
H – номинальная быстроходность (число модулей), при которой коэффициент использования энергии ветра максимальный (ξ_{max}); $\overline{M}_H$ – номинальный относительный вращающий момент, который развивает ветроколесо при номинальном числе модулей Z_H; $\overline{M}_0$ – начальный относительный момент, развиваемый колесом при трогании с места, т.е. когда $Z = 0$; Z_0 – синхронная быстроходность, при которой $\overline{M} = 0$; $\overline{M}_{max}$ – максимальный момент, развиваемый ветроколесом; отношение ($\overline{M}_{max} / \overline{M}_H$) называется перегрузочной способностью ветроколеса

Аэродинамическую характеристику строят в относительных величинах, поэтому она является общей для ветроколес любых размеров, если у них соблюдено геометрическое подобие. Основными точками кривой, определяющими главные параметры характеристики, являются:

$$Z_H = \frac{\omega_{ном} R}{v}$$

Приведенные характеристики ветроколес различной быстроходности (рис. 9.12), а также результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

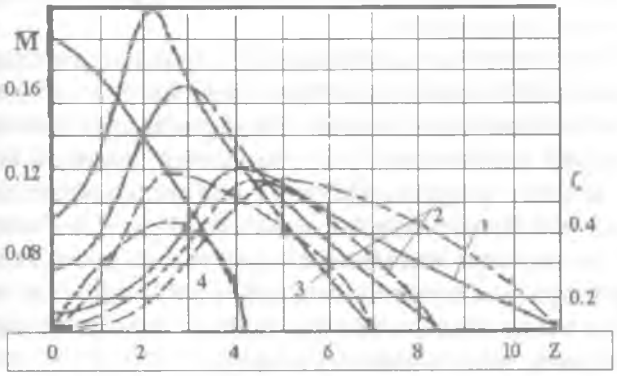


Рисунок 9.12. *Характеристики ветроколес различной быстроходности:*
1-2 – лопастного; 2-3 – лопастного; 3-6 – лопастного; 4-18 – лопастного; сплошные линии M(Z); штриховые (Z)

Чем больше число лопастей, их ширина и угол заклинивания, тем ниже быстроходность ветроколеса и кривая имеет крутопадающую форму.

Быстроходные ветроколеса развивают начальный момент M_0, в несколько раз меньше номинального момента M_H, а синхронная быстроходность в 2-2,5 раза выше номинальной.

Мощность ветроколеса, при прочих равных условиях, мало зависит от числа лопастей и коэффициента заполнения $k^3 = F_\Sigma / A$, представляющего собой отношение площади лопастей к ометаемой поверхности. Основное влияние оказывают форма и профиль лопастей, их положение в потоке воздуха и диаметр ветроколеса.

Снижение начального момента происходит быстрее, чем рост быстроходности. Так, при увеличении Z_H в два раза M_0 снижается в шесть-семь раз. В то же время приемистость, определяемая отношением M_0/M_H, у шестилопастного колеса в 3,3 раза выше, чем у двухлопастного.

Для постоянной аэродинамической схемы частота вращения ветроколеса прямо пропорциональна его быстро-

ходности и скорости ветра и обратно пропорциональна диаметру ветроколеса.

При выборе ветроагрегатов учитывают аэродинамические характеристики ветроколес и нагрузочные характеристики рабочих машин. Например, для привода тихоходной рабочей машины, имеющей большой начальный момент сопротивления, лучше использовать многолопастное тихоходное ветроколесо ($Z_н$ = 1,5-3). Это позволяет снизить значение минимальных рабочих скоростей ветра, уменьшить передаточное отношение редуктора и механические потери, но при этом снижается коэффициент использования ветра.

Для агрегатирования генератора, требующего большую частоту вращения и малый начальный момент, эффективнее использовать быстроходные ветроколеса ($Z_н$ = 5–8) с малым числом лопастей.

Для эффективного преобразования энергии ветра в зависимости от числа лопастей ветроколеса необходимо соответствующее оптимальное число модулей. Поэтому оптимальная быстроходность n-лопастного ветроколеса соответствует условию:

$$Z_н = \frac{\omega_{вк} R}{v}.$$

Например, для 2-лопастного ветроколеса коэффициент будет максимальным при $Z_н = 4\pi/2=6$, для 4-лопастного – при $Z_н = 3$.

Улучшить пусковые и рабочие характеристики ветроагрегатов можно несколькими методами (отключением нагрузки на период разгона ветроколеса, применением различных муфт, аэродинамических устройств). В быстроходных ветроагрегатах применяют автоматические системы управления поворотом лопастей.

9.8. Принцип работы ветроколеса

Ветроколесо, вращаясь под действием силы ветра, преобразует энергию ветра в механическую работу. Вращение ветроколеса обусловлено действием сил сопротивления или подъемной силы. Действие этих сил зависит от геометрии расположения лопастей.

Воздушный поток, обтекая ветроколесо, создает лобовое давление, называемое силой сопротивления. При этом величина силы сопротивления зависит от формы лопастей, состояния их поверхности и положения относительно направления воздушного потока, на плоскость, расположенную перпендикулярно к потоку и двигающуюся по направлению ветра, действует воздушный поток силой R_X. Под действием силы сопротивления ветроколесо приводится во вращение в плоскости, параллельной направлению ветра.

Для определения R_X ее изучают в аэродинамической трубе. При этом вводятся соответствующие коэффициенты, с помощью которых от сил и моментов, действующих на модель, переходят к соответствующим силам и моментам, действующим на натурное тело (лопасти ветроколеса).

Сила сопротивления может быть определена выражением:

$$R_X = C_X A \frac{\rho}{2} v^2, \tag{9.20}$$

где C_X – коэффициент аэродинамической силы сопротивления; A – площадь крыла.

Установлено, что сила сопротивления зависит от формы обтекающего тела, и чем она больше, тем больше завихрен поток, обтекающий тело, в частности, лопасти ветроколеса. Например, у вогнутого полого полушара C_X в 4 раза больше, чем у выпуклого.

На плоскость, расположенную под некоторым углом к направлению воздушного потока, называемым углом атаки, действует некоторая сила R (рис. 9.13). Эта сила

раскладывается на две составляющие: сила R_Y действует вверх по вертикали и называется подъемной силой; сила R_X создает лобовое давление и вызывает силу сопротивления.

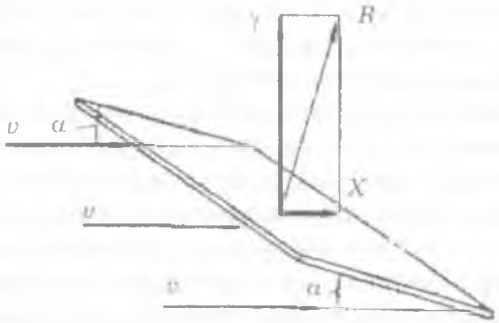


Рисунок 9.13. *Подъемная сила, действующая на плоскость под углом атаки* α

Подъемная сила выполняет полезную работу, приводя во вращение ветроколесо в плоскости, перпендикулярной направлению воздушного потока. Подъемная сила зависит от формы поперечного сечения крыла. Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе позволили установить форму поперечного сечения крыла, которая дает наибольшую подъемную силу и наименьшую силу сопротивления. На рис. 9.14 для сравнения различных форм профиля показаны подъемные силы и силы сопротивления при одинаковом угле атаки. Наибольшую подъемную силу и наименьшее сопротивление имеет обтекаемый профиль.

Обтекаемый профиль при малых углах атаки почти не вызывает вихрей, а пластинка вызывает значительные вихри на передней кромке. Вихри снижают подъемную силу и увеличивают силу сопротивления.

Подъемную силу можно определить по аэродинамическому коэффициенту C_Y:

$$R_Y = C_Y A \frac{\rho}{2} v^2, \qquad (9.21)$$

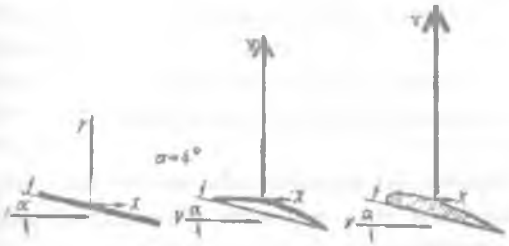


Рисунок 9.14. *Подъемная сила, действующая на поверхности различного профиля*

Отношение коэффициента подъемной силы к коэффициенту силы сопротивления называется качеством крыла:

$$k = \frac{C_Y}{C_X}, \tag{9.22}$$

Качество крыла у обтекаемых лопастей может достигать величины k=24 и более. Это значит, что подъемная сила лопасти при малых углах атаки в 24 раза больше силы сопротивления.

При взаимодействии воздушного потока с лопастью возникают:

– сила сопротивления – параллельная направлению ветра;

– подъемная сила – перпендикулярная силе сопротивления;

– препятствие для набегающего потока. Это свойство характеризуется коэффициентом заполнения. Так, при одинаковой форме 4-лопастное колесо имеет вдвое большее геометрическое заполнение, чем 2-лопастное;

– турбулизация потока, т.е. возмущение его скорости по величине и направлению как за колесом, так и перед ним. В результате лопасть часто оказывается в потоке, турбулизированном другими лопастями.

Таким образом, воздушный поток под действием силы сопротивления или подъемной силы приводит в движение ветроколесо. Полезное действие этих сил зависит от геометрии расположения ветроколеса и формы самих лопастей.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Примеры выполнения гелиоэнергетических расчетов

Пример 1. Расчет изменения плотности потока солнечного излучения в течение суток на горизонтальную поверхность для января

Решение:

Определяем склонение Солнца:

Январь

$\delta_1 = \delta_o \sin[360^\circ (284 + n)/365] = 23{,}45 \sin[360^\circ (284 + 15/365] = 23{,}45 \sin[295] = -21{,}3^\circ$

Определяем продолжительность светового дня:

Январь

$T_{c1} = (2|15)\cos^{-1}(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta_1) = (2|15)\cos^{1}[-\operatorname{tg} 50^\circ \varphi \operatorname{tg}(-21{,}3^\circ)] = (2|15)\cos^{1}[-1{,}19\ (-0{,}39)] = 8{,}3$

Определяем координату точки начала отсчета t/:

Январь

$t_{a1} = (t_{tcc} - 0{,}5\ T_{c1}) = (12 - 0{,}5\ 8{,}3) = 7{,}85$

Определяем значение суточного прихода прямой солнечной радиации, МДж/м^2:

Январь

Ясное небо $H_{D\,сут} = H_{D\,мес}/\ N = 151/\ 31 = 4{,}87$

Средние условия облачности $H_{D\,сут} = H_{D\,мес}/\ N = 63/\ 31 = 2{,}03$

$H_{D\,мес}$ – месячный приход прямой солнечной радиации, берется согласно данным табл.

Определяем максимальное значение плотности солнечной радиации, Вт/м^2:

Январь

Ясное небо $I\ hmax = (\pi/2 \cdot Tc1)\ H_{D\,сут} = (3{,}14/2\ 8{,}3)\ 1350 = 236$

Средние условия облачности $I_{hmax} = (\pi/2\ Tc1)\ H_{D\,сут} = (3{,}14/2\ 8{,}3)\ 564 = 107$

Определяем текущее значение плотности солнечной радиации:

Январь

Ясное небо

$t' = 1$ ч $I\,h1 = I\,hmax \sin(180\,t'/Tc1) = 236\,(180\,1/8.3) = 87.2$

$t' = 2$ ч $I\,h1 = I\,hmax \sin(180\,t'/Tc1) = 236\,(180\,2/8.3) = 162$

$t' = 3$ ч $I\,h1 = I\,hmax \sin(180\,t'/Tc1) = 236\,(180\,3/8.3) = 214$

$t' = 4$ ч $I\,h1 = I\,hmax \sin(180\,t'/Tc1) = 236\,(180\,4/8.3) = 236$

средние условия

облачности

$t' = 1$ ч $I\,h1 = I\,hmax \sin(180\,t'/Tc1) = 107\,(180\,1/8,3) = 39,5$

$t' = 2$ ч $I\,h1 = I\,hmax \sin(180\,t'/Tc1) = 107\,(180\,2/8,3) = 73/5$

$t' = 3$ ч $I\,h1 = I\,hmax \sin(180\,t'/Tc1) = 107\,(180\,3/8.3) = 97$

$t' = 4$ ч $I\,h1 = I\,hmax \sin(180\,t'/Tc1) = 107\,(180\,4/8,3) = 107$

Пример 2. Рассчитать склонение Солнца – δ, часовой угол Солнца – ω, продолжительность солнечного сияния в течение суток – T_e в точке А с координатами (широта – φ, долгота – ψ) в рассматриваемые сутки года

Исходные данные: рассматривается точка с координатами φ и ψ. Известен номер суток с начала года – n. Заданы границы часового пояса, в которой находится точка А по долготе (ψ_{min}, ψ_o, ψ_{max}) при ψ_o = const, где ψ_o – долгота, по которой зональное (поясное) и декретное время совпадают.

Необходимо рассчитать склонение Солнца, часовой угол Солнца, продолжительность солнечного сияния в течение суток для июля, августа и сентября для точки А с координатами:

$\varphi = 52^\circ$ с.ш.; $\psi_{min} = 60^\circ$: $\psi_o = 67{,}5^\circ$; $\psi_{max} = 75^\circ$

Решение:

Определяем склонение Солнца δ в указанные месяцы:

Июль

$\delta_7 = \delta_o \sin[360^\circ (284 + n)/365] = 23{,}45 \sin[360^\circ (284 + 196/365] = 23{,}45 \sin[473] = 21{,}6^\circ$

Август

$\delta_8 = \delta_o \sin[360^\circ (284 + n)/365] = 23{,}45 \sin[360^\circ (284 + 227/365] = 23{,}45 \sin[504] = 13{,}8^\circ$

Сентябрь

$\delta_9 = \delta_0 \sin[360^\circ (284 + n)/365] = 23{,}45 \sin[360^\circ (284 + 258/365] = 23{,}45 \sin[535] = 2{,}2$

Определяем продолжительность светового дня, T:

Июль

$T_{-7} = (2|15)\cos^{-1}(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta) = (2|15)\cos^{-1}(-\operatorname{tg} 52^\circ \operatorname{tg} 21.6^\circ) = =(2|15)\cos^{-1}(-1{,}28\ 0{,}4) = 16{,}1$

Август

$T_{-8} = (2|15)\cos^{-1}(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta) = (2|15)\cos^{-1}(-\operatorname{tg} 52^\circ \operatorname{tg} 13{,}8\ 0) = = (2|15)\cos^{-1}(-1{,}28\ 0{,}25) = 14{,}5$

Сентябрь

$T_{-9} = (2|15)\cos\text{-}1(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta) = (2|15)\cos^{-1}(-\operatorname{tg} 52^\circ \operatorname{tg} 2{,}2^\circ) = = (2|15)\cos^{-1}(-1{,}28\ 0{,}04) = 12{,}4$

Результаты расчетов заносятся в таблицу.

Таблица 1

Определение склонения Солнца и продолжительности светового дня

Месяц	июль	август	сентябрь
Номер дня месяца	196	227	258
Склонение Солнца, град	$21{,}6^0$	$13{,}8^0$	$2{,}2^0$
Продолжительность светового дня, ч	16,1	14,5	12,4

Определяем часовой угол Солнца с 10 по 18 ч местного времени:

10 ч

$\omega_7 = (15^\circ \text{ч}^{-1})(t_{zone}\text{-}12\text{ч}) + (\psi - \psi_0) = (15^\circ \text{ч}^{-1})(10\text{ч} - 12\text{ч}) + (70 - - 67{,}5) = -27{,}5^\circ$

12 ч

$\omega_7 = (15^\circ \text{ч}^{-1})(t_{zone}\text{-}12\text{ч}) + (\psi - \psi_0) = (15^\circ \text{ч}^{-1})(12\text{ч} - 12\text{ч}) + (70 - 67{,}5) = 2{,}5^\circ$

14 ч

$\omega_7 = (15^\circ \text{ч}^{-1})(t_{zone}\text{-}12\text{ч}) + (\psi - \psi_0) = (15^\circ \text{ч}^{-1})(14\text{ч} - 12\text{ч}) + (70 - 67{,}5) = 32{,}5^\circ$

16 ч

$\omega_7 = (15^\circ \text{ч}^{-1})(t_{zone}\text{-}12\text{ч}) + (\psi - \psi_0) = (15^\circ \text{ч}^{-1})(16\text{ч} - 12\text{ч}) + (70 - 67{,}5) = 62{,}5^\circ$

18 ч

$\omega_{\tau} = (15\ ч^{-1})\ (t_{zone}\text{-}12ч)+(\psi-\psi_0) = (15\ ч^{-1})\ (18ч-12ч)+(70 - 67{,}5)= 92{,}5^{\circ}$

Результаты расчетов заносятся в таблицу.

Таблица 2

Часовой угол Солнца

Местное время, ч	10	12	14	16	18
Часовой угол Солнца ω, град	$-27{,}5^{0}$	$2{,}5^{0}$	$32{,}5^{0}$	$62{,}5^{0}$	$92{,}5^{0}$

Пример 3. Для точки с заданными координатами определить приход диффузной солнечной радиации на горизонтальную поверхность.

Исходные данные:

Задана точка А с координатами $\varphi = 50^{\circ}$ с.ш. Расчетные месяцы – январь, февраль, март.

Для указанных месяцев определить приход диффузной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности и ясном небе.

Решение:

Определяем показатель облачности K_m при средних условиях облачности. Для этого суточное значение суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность разделим на суммарную солнечную радиацию за пределами земной атмосферы:

Январь

$K_m = H_{Gcym}/H_0 = 4{,}32 / 9{,}0 = 0{,}48$

Февраль

$K_m = H_{Gcym}/H_0 = 7{,}79/14{,}5 = 0{,}54$

Март

$K_m = H_{Gcym}/\mathrm{H}_0 = 12{,}97/22{,}3 = 0{,}58$

Определяем отношение H_d/H_G:

Январь

$H_d/H_G = 1{,}39 - 4{,}03\ K_m + 5{,}53\ K_m^{\,2} - 3{,}11\ K_m^{\,3} =$

$= 1{,}39 - 4{,}03\ 0{,}48 + 5{,}53\ 0{,}482 - 3{,}11\ 0{,}48\ 3 = 0{,}39$

Февраль

$H_d / H_G = 1{,}39 - 4{,}03\ K_m + 5{,}53\ K_m^2 - 3{,}11\ K_m^3 =$

$= 1{,}39 - 4{,}03\ 0{,}54 + 5{,}53\ 0{,}542 - 3{,}11\ 0{,}54\ 3 = 0{,}33$

Март

$H_d / H_G = 1{,}39 - 4{,}03\ K_m + 5{,}53\ K_m^2 - 3{,}11\ K_m^3 =$

$= 1{,}39 - 4{,}03\ 0{,}58 + 5{,}53\ 0{,}582 - 3{,}11\ 0{,}58\ 3 = 0{,}30$

Определяем месячный приход диффузной солнечной радиации, МДж/м^2:

Январь

$H_d = H_{Gмес}\ 0{,}39 = 134\ 0{,}39 = 52{,}3$

Февраль

$H_d = H_{Gмес}\ 0{,}33 = 218\ 0{,}33 = 72{,}0$

Март

$H_d = H_{Gмес}\ 0{,}30 = 402\ 0{,}30 = 121$

Аналогичные расчеты можно провести и для условий ясного неба.

Результаты расчетов заносятся в таблицу.

Таблица 3

Определение диффузной составляющей солнечной радиации

Месяц	Ясное небо			Средние условия облачности		
	$K_т$	H_d / H_G	H_d	$K_т$	H_d / H_G	H_d
Январь				0,48	0,39	52,3
Февраль				0,54	0,33	72,0
Март				0,58	0,30	121,0

Пример 4. Расчет среднемесячного потока солнечной радиации на наклонную площадку по методу Луи-Джордана.

Исходные данные:

Задана точка А с $\varphi = 50^\circ$ северной широты, в которой установлена наклонная площадка – приемник солнечного излучения. Площадка наклонена к горизонту под углом $s = 35^\circ$ и ориентирована строго на юг по меридиану.

Необходимо для средних суток января, февраля и марта определить среднемесячный поток суммарной солнечной радиации.

Решение:

Январь

Определяем отношение:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - s)\cdot\cos\delta\cdot\sin\omega_s + \pi/180\cdot\omega_s\cdot\sin(\varphi - s)\cdot\sin\delta}{\cos\varphi\cdot\cos\delta\cdot\sin\omega_s + \pi/180\cdot\omega_s\cdot\sin\varphi\cdot\cdot\sin\delta},$$

Определяем склонение Солнца:

$\delta = \delta_0 \sin[360^\circ(284+n)/365] = 23{,}45\sin[360^\circ(284+15)/365] = -21{,}30$

Определяем часовой угол захода Солнца на горизонтальную поверхность:

$\omega_s = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\delta) = \arccos[(-\operatorname{tg}50^\circ)(\operatorname{tg}-21{,}30)] = \arccos[(-1{,}19)(-0{,}39)] = 62{,}3^\circ$

Определяем часовой угол захода Солнца на наклонную поверхность:

$\omega_s' = \min\{\omega_s; \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - s)\operatorname{tg}\delta)]\} = \min\{\omega_s; \arccos[(-\operatorname{tg}15^\circ)(\operatorname{tg}-21{,}3^\circ)]\} = \min\{\omega_s; \arccos(0{,}27-0{,}39) = 96^\circ$

Следовательно, в качестве ω_s' выбираем $\omega_s' = 62{,}30$, как минимальное из ω_s' и ω_s.

Результаты расчетов сводим в таблицу.

Таблица 4

Расчет отношения R_b

Расчетная величина	№ месяца		
	1		
cos (φ- s)	0,966		
sin (φ- s)	0,259		
cos φ	0,643		
sin φ	0,766		

δ	-21,3		
cos δ	0,932		
sin δ	-0,363		
ω_s	62,3		
ω_s'	62,3		
sin ω_s	0,885		
sin ω_s	0,885		
tg φ	1,19		
tg δ	-0,39		
tg (φ- s)	0,27		
R_b	3,08		

Определяем отношение R:

$$R = (1 - H_d/H_G)R_b + (Hd/HG)[(1+\cos s)/2] + [(1-\cos s)/2] =$$
$$= (1 - 88/134)3{,}01 + (88/134)[(1+\cos 15^\circ)/2] + 0{,}7[(1-\cos 15^\circ)/2] = 1{,}69$$

Определяем среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность при средних условиях облачности, МДж/м^2:

$$H_{Gscym} = (H_G/N)\,R = (134/31)\,1{,}69 = 7{,}31$$

Результаты расчетов сводим в таблицу.

Таблица 5

Среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность

Расчетная величина	№ месяца		
	1		
H_d/H_G	0 657		
(1+cos s)/2	0 91		
(1-cos s)/2	0.09		
1 - H_d/H_G	0 343		
cos s	0 819		
ρ	0.7		
R_b	3.08		
R	1.69		
H_{Gscyt}	7.31		

По полученным результатам можно построить зависимости $R = f$(мес) и $H_{Gсут} = f$(мес).

Пример 5. Рассчитать часовые значения суммарной солнечной радиации на горизонтальную и наклонную поверхности.

Исходные данные:

Задана точка с координатами $\varphi = 50^{\circ}$ с.ш. и $\psi =$ __.

Угол наклона площадки к горизонту равен $s = 35^{\circ}$.

Рассчитать часовые значения суммарной солнечной радиации на горизонтальную и наклонную поверхности для 15 января.

Решение:

Определяем среднесуточное значение суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для января и $\varphi = 50^{\circ}$ с.ш.:

$$H_{Gсут} = H_{Gмес}/N = 134/31 = 4{,}32,$$

где $H_{Gмес}$ – среднемесячный приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, МДж/м^2 (табл. 1); N – число дней месяца.

Продолжительность светового дня для 15 января составляет $T_c = 8$ час.

Определяем среднесуточное значение рассеянной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для января и $\varphi = 50^{\circ}$ с.ш.

$$H_{dсут} = H_{dмес}/N = 71/31 = 2{,}29,$$

где $H_{dмес}$ – среднемесячный приход рассеянной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, МДж/м^2; N – число дней месяца.

Определяем среднесуточное значение прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность для января и $\varphi = 50^{\circ}$ с.ш.

$$H_{Dсут} = H_{Dмес}/N = 63/31 = 2{,}03,$$

где $H_{Дмес}$ – среднемесячный приход прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность, МДж/м²; N – число дней месяца.

Определяем продолжительность светового дня для 15 января:

$$T_c = (2|15)\cos^{-1}(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta).$$

Определяем отношение среднечасовых к среднесуточным значениям суммарной и рассеянной радиации на горизонтальную поверхность при $T_c = 8$ час при различных значениях времени от истинного солнечного полдня t' :

$$H_{Gh} / H_{Gcym} = \alpha(t')$$

$$H_{dh} / H_{dcym} = \alpha(t').$$

Среднечасовые значения прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность определяем согласно выражению.

Результаты расчетов сведем в таблицу.

Таблица 6

Часовые значения солнечной радиации на горизонтальную поверхность

t	H_{Gh}// $H_{Gсут}$	H_{Gh}	H_{dh}/ $H_{dсут}$	H_{dh}	H_{Dh}
0,5	0,2	0,86	0,19	0,42	0,44
1,5	0,16	0,69	0,25	0,32	0,37
2,5	0,10	0,43	0,09	0,18	
3,5	0,04	0,173	0,04	0,08	

Определяем значение среднечасовой прямой солнечной радиации на наклонную поверхность согласно выражению:

$$H_{Dhs} = H_{Dh}(\cos i/\cos z).$$

Для этого вначале определим численное значение коэффициента R_h согласно выражению.

Результаты расчетов сведем в таблицу.

Таблица 7

Расчет коэффициента R_h

Sin δ	Sin φ	Sin s	Cos δ	Cos φ	Cos s	Sin γ	Cos γ
-0,328	0,707	0,522	0,945	0,707	0,853	0,0	1,0

Таблица 8

Расчет среднечасовой прямой солнечной радиации на наклонную поверхность

t	cosi	cosz	cos	R_h	H_{Dh}	H_{Dhs}
0,5	0,84	0,434	0,997	1,94	0,44	0,852
1,5	0,814	0,403	0,951	2,02	0,37	0,747
2,5	0,758	0,338	0,853	2,24	0,25	0,561
3,5	0,675	0,240	0,707	2,81	0,09	0,253

Определяем значение среднечасовой рассеянной солнечной радиации на наклонную поверхность согласно выражению:

$$H_{dhs} = H_{dh}\,[(1+\cos s)/2].$$

Определяем значение среднечасовой отраженной солнечной радиации на наклонную поверхность согласно выражению:

$$H_{ghs} = \rho H_{Gh}[(1-\cos s)/2],$$

где $\rho = 0,7$ (для зимних месяцев).

Определяем среднечасовую суммарную радиация на наклонную поверхность для каждого часа от истинного солнечного полдня согласно выражение:

$$H_{Ghs} = H_{Dhs} + H_{dhs} + H_{ghs}.$$

Результаты расчетов сведем в таблицу.

Таблица 9

t	H_{Dhs}	H_{dhs}	H_{ghs}	H_{Ghs}
0,5	0,852	0,39	0,045	1,29
1,5	0,747	0,30	0,036	1,08
2,5	0,561	0,17	0,022	0,753
3,5	0,253	0,07	0,009	0,332

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Статистические данные о приходе различных составляющих солнечного излучения по территории Республики Казахстан

Таблица 1

Отношение прямой радиации к суммарной радиации при средних условиях облачности

Широта, %, градус		год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
60%	490	2940,5 4863	54,5 138,3	123,2 230	217,9 403	287,4 497	413,1 664,5	426,6 702	406,4 678,8	395 601,7	295 431,6	160 267,3	67,9 138,3	57,8 110,6
59,4 %	500	2803 4718	50,3 134,1	113,1 218	217,9 402	280,7 490	398 649,5	444 691,4	377,1 657,8	364,5 574	276,5 410,6	146,7 251,4	67 134,1	54,5 104,8
58,5 %	510	2684 4586,4	46,1 124	104 205,3	211,23 94	273,2 487	383 638,6	433,2 684,6	373,7 650,3	360,3 570	257,3 390	133,2 236,3	62 124,5	47 93,9
57,5 %	520	2577 4478,3	41,9 114	93,9 192,7	204,5 385,5	265,6 483,5	368 627,7	422 678	370,4 642,7	356,2 565,7	238 368,7	120 221	57 115,6	39,4 83
56%	530	2469 4400	37,07 104	83 180,2	198 377,1	258 480	352,8 616,8	411,5 671,2	367 635,2	352 561,5	218 347,8	106,4 206	52 106,4	31,8 72,1
56,7 %	540	2403 4235,3	33,5 93,9	73 167,6	191,1 368,7	250,6 476,8	337,4 605,9	400,5 664,5	363,6 627,7	347,85 57,3	199 326,8	93 191	47 97,2	24,3 61,2
54,7 %	550	2254 4118,2	29,3 83,8	62,9 155	184,4 360,3	249 473,5	322,6 595	390 657,8	360,3 620,1	343,6 553,1	180 305,5	80 176	41,9 88	16,2 50,3
60% 54,7%			39% 35%	53,6% 40,6%	54% 51,2%	57,8% 52,6%	62,2% 54,2%	65,9% 59,3%	59,9% 58,1%	65,6% 62,1%	68,4% 59%	60% 45,5 %	49,1% 47,6%	52,3% 33,2%
Среднее 57,5%			36,66%	47,89 %	52,87 %	55,0 %	58,46%	62,3 %	58 %	63,2 %	64,1 %	53,6 %	49 %	45,4 %

Таблица 2

Процентное содержание прямой радиации от суммарной радиации при средних условиях облачности

Широта, %, градус		год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
60%	490	2940,5 4863	39%	53,6%	54%	57,8%	62,2%	65,9%	59,9%	65,6%	68,4%	60%	49,1 %	52,3%
59,4 %	500	2803 4718	37,5%	51,9%	54%	57,3%	61,3%	64,2%	57,3%	63,5%	67,3%	58,4%	50%	52%
58,5 %	510	2684 4586,4	37%	50,7%	53,6%	56,1%	60%	63,3%	57,5%	63,2%	66%	56,4%	49,8 %	50%
57,5 %	520	2577 4478,3	36,8%	48,7%	53%	55%	58,6%	62,2%	57,6%	63%	64,6%	54,3%	49,3 %	47,5%
56%	530	2469 4400	35,6%	46,1%	52,5%	53,6%	57,2%	61%	57,8%	62,7%	62,7%	51,7%	48,9 %	44%
56,7 %	540	2403 4235,3	35,7%	43,6%	51,8%	52,6%	55,7%	60,3%	58%	62,4%	61%	48,7%	48,4 %	40%
54,7 %	550	2254 4118,2	35%	40,6%	51,2%	52,6%	54,2%	59,3%	58,1%	62,1%	59%	45,5%	47,6 %	32,2%
60% 54,7%			39% 35%	53,6% 40,6%	54% 51,2%	57,8% 52,6%	62,2% 54,2%	65,9% 59,3%	59,9% 58,1%	65,6% 62,1%	68,4% 59%	60% 45,5%	49,1 % 47,6 %	52,3% 33,2%
Среднее 57,5%			36,66 %	47,89 %	52,87 %	55,0 %	58,46 %	62,3 %	58 %	63,2 %	64,1 %	53,6 %	49 %	45,4 %

Таблица 3

Суммарная радиация при средних условиях облачности

Широта, градус	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
490	4,46 138,3	8,21 230	13,0 403	16,57 497	21,44 664,5	23,41 702,2	21,9 678,8	19,41 601,7	14,39 431,6	8,62 267,3	4,61 138,3	3,57 110,6	4863
500	4,33 134,1	7,79 218	12,97 402	16,33 490	20,95 649,5	23,05 691,4	21,22 657,8	18,52 574	13,69 410,6	8,11 251,4	4,47 134,1	3,38 104,8	4718
510	4,0 124	7,33 205,3	12,7 394	16,23 487	20,6 638,6	22,82 684,6	20,98 650,3	18,39 570	13,0 390	7,62 236,3	4,15 124,5	3,03 93,9	4586,4
520	3,68 114	6,88 192,7	12,44 385,5	16,12 483,5	20,25 627,7	22,6 678	20,73 642,7	18,25 565,7	12,29 368,7	7,13 221	3,85 115,6	2,68 83	4478,3
530	3,35 104	6,44 180,2	12,16 377,1	16,0 480	19,9 616,8	22,37 671,2	20,49 635,2	18,11 561,5	11,59 347,8	6,65 206	3,55 106,4	2,33 72,1	4400
540	3,03 93,9	5,99 167,6	11,9 368,7	15,9 476,8	19,55 605,9	22,15 664,5	20,25 627,7	17,98 557,3	10,89 326,8	6,16 191	3,24 97,2	1,97 61.2	4235,3
550	2,70 83,8	5,54 155	11,62 360,3	15,78 473,5	19,19 595	21,93 657,8	20,0 620,12	17,84 553,1	10,18 305,5	5,68 176	2,93 88	1,62 50,3	4118,2

Таблица 4

Прямая радиация, падающая на горизонтальную поверхность, при средних условиях облачности

Широта, градус	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
490	1,76 54,5	4,4 123,2	7,03 217,9	9,58 287,4	13,33 413,1	15,0 462,6	13,12 406,4	12,74 395	9,83 295	5,16 160	2,26 67,9	1,86 57,8	2940,5
500	1,62 50,3	4,04 113,1	7,03 217,9	9,36 280,7	12,84 398	14,8 444	12,16 377,1	11,76 364,5	9,22 276,5	4,73 146,7	2,23 67	1,76 54,5	2803
510	1,49 46,1	3,71 104	6,81 211,2	9,11 273,2	12,35 383	14,44 433,2	12,05 373,7	11,62 360,3	8,58 257,3	4,30 133,2	2,07 62	1,52 47	2684
520	1,35 41,9	3,35 93,9	6,6 204,5	8,85 265,6	11,87 368	14,07 422	11,95 370,4	11,49 356,2	7,93 238	3,87 120	1,9 57	1,27 39,4	2577
530	1,20 37,07	2,96 83	6,39 198	8,6 258	11,38 352,8	13,72 411,5	11,84 367	11,35 352	7,27 218	3,43 106,4	1,73 52	1,025 31,8	2469
540	1,08 33,5	2,61 73	6,16 191,1	8,35 250,6	10,88 337,4	13,35 400,5	11,73 363,6	11,22 347,8	6,63 199	3,0 93	1,57 47	0,78 24,3	2403
550	0,945 29,3	2,25 62,9	5,95 184,4	8,3 249	10,41 322,6	13,0 390	11,62 360,3	11,08 343,6	6,0 180	2,58 80	1,4 41,9	0,54 16,8	2254

Таблица 5

Рассеянная радиация, падающая на горизонтальной поверхность, при средних условиях облачности, МДж/м²

Широта, градус	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
49°	2,7 83,8	3,81 106,8	5,97 185,1	6,99 209,6	8,11 251,4	7,99 239,6	8,79 272,4	6,67 206,7	4,55 136,6	3,46 107,3	2,35 70,4	1,7 52,8
50°	2,7 83,8	3,75 104,9	5,94 184,1	6,99 209,6	8,11 251,5	8,25 247,4	9,05 280	6,76 209,5	4,47 134,1	3,38 104,7	2,24 67,1	1,62 50,3
51°	2,51 77,9	3,62 101,3	5,9 182,5	6,98 209,3	8,25 255,6	8,38 251,4	8,92 276,6	6,76 209,7	4,42 132,7	3,33 103,1	2,08 62,5	1,51 46,9
52°	2,32 72,1	3,53 98,8	5,84 181	7,13 213,8	8,38 259,7	8,53 256	8,78 272,3	6,76 209,5	4,36 130,7	3,84 119	1,95 58,6	1,41 43,6
53°	2,16 66,93	3,47 97,2	5,78 179,1	7,26 217,9	8,52 264	8,66 259,7	8,65 268,2	6,76 209,5	4,33 129,8	3,21 99,6	1,81 54,4	1,3 40,3
54°	1,95 60,4	3,38 94,6	5,73 177,6	7,54 226,2	8,66 268,5	8,8 264	8,52 264,1	6,76 209,5	4,26 127,8	3,16 98,0	1,67 50,2	1,2 36,9
55°	1,76 54,5	3,29 92,1	5,67 175,9	7,48 224,5	8,79 272,4	8,93 267,8	8,38 259,8	6,76 209,5	4,18 125,5	3,1 96	1,54 46,1	1,1 33,5
	63,34%	52,11%	47,13%	45%	41,54%	37,7%	42%	36,8%	35,9%	46,4%	51%	54,6%

Таблица 6

Прямая радиация, падающая на горизонтальную поверхность, при ясном небе

Широта, градус	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
49°	164,2	238	445,8	589,1	771	783,5	745,8	678,8	483,5	336,9	191	129	5556,8
50°	150,8	226,3	435,3	582,4	737,4	775	745,8	645,3	477,7	326,8	180,2	117,3	5401
51°	140	216	423,5	575	734	776	742,5	638,6	467,6	313,4	169,3	108	5307
52°	129	206	413,1	567,3	730,7	776,8	739	632	457,5	300	158,4	98,9	5209
53°	118,2	196,1	400	560	727,4	778	735,8	625	447,5	286,6	147,5	90	5111
54°	107,3	186	328	552	724	778,5	732	618	437,4	273,2	136,6	80,4	5009
55°	96,4	176	368,7	545	720,7	779,3	729,1	611,7	427,4	260	125,7	71,2	4911

Таблица 7

Суммарная радиация при безоблачном небе

Широта, градус	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
49°	216,2	323,5	558,1	717,3	883,3	915,1	890	767,6	578,2	417,3	236,3	181	6683,9
50°	201	310,1	548,9	708,1	880	913,4	888,3	726,6	570	406,4	222	167,6	6536,4
51°	187,7	296.7	534,6	702,2	878,2	914,2	887,4	759,2	559	390,5	209,3	155	6475,2
52°	174,3	283,2	520,3	696,4	876,5	915,1	886,6	755,9	548	374,6	198,6	142,5	6372,2
53°	160,9	270	506	690,5	874,9	915,9	885,8	725,5	537,2	358,7	186,9	130	6269,1
54°	147,5	256	492	684,6	873,2	916,8	885	749,2	526,3	342,7	175	117,3	6166
55°	134,1	243	477,4	678,8	871,5	917,6	884,1	745,8	515,4	326,3	163,4	105	6021

Таблица 8

Продолжительность солнечного дня, ч

Широта, градус	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
49^0	8,5	9,92	11,6	13,43	15	15,86	15,48	14	12,3	10,4	8.88	8
50^0	8,37	9,84	11,58	13,34	15,15	16	15,64	14,18	12,32	10,37	8,76	7,93
51^0	8,24	9,76	11,57	13,54	15,27	16,17	15,76	14,27	12,33	10,37	8,65	7,77
52^0	8,07	9,68	11,56	13,59	15,4	16,36	15,91	14,35	12,34	10,31	8,51	7,59
53^0	7,91	9,6	11,55	13,66	15,53	16,53	16,07	14,44	12,36	10,24	8,38	7,41
54^0	7,85	9,51	11,54	13,73	15,68	16,73	16,24	14,54	12,37	10,17	8,23	7,21
55^0	7,57	9,4	11,53	13,8	15,83	16,92	16,43	14,63	12,38	10,11	8,07	7

Таблица 9

Данные по Акмолинской области

Вид радиации	Суммарная радиация, мДж/м^2											
Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Среднесуточная	4,61	8,13	12,7	13	21,9	21,3	20	17,9	12,3	7,29	4,6	3,26
Сумма за месяц	142	235	395	412	679	638	648	555	370	226	138	101

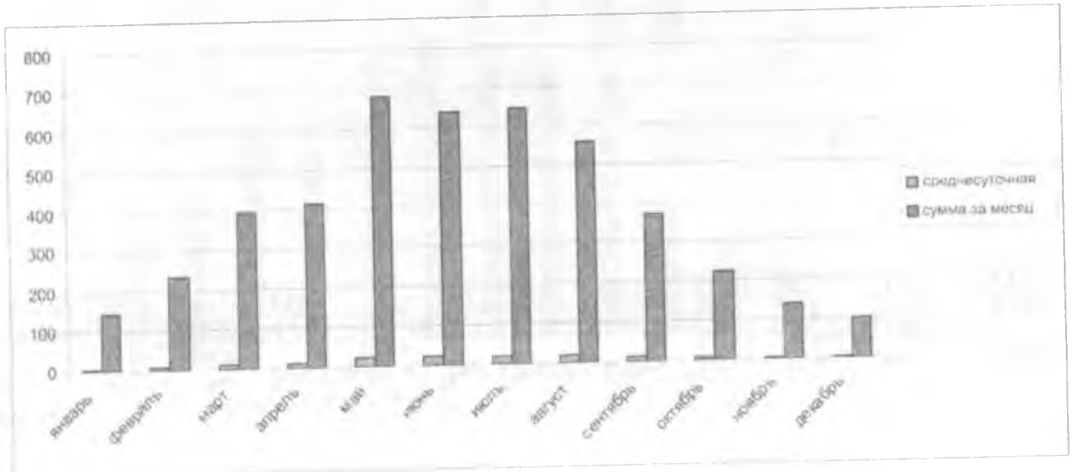


Таблица 10

Вид радиации	Прямая радиация, мДж/м^2											
месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Среднесуточная	1,6	3,27	4,8	7	13,1	11,6	12	9,9	5,8	3,39	1,46	0,83
Сумма за месяц	49,6	94,7	148	212	407	349	385	306	175	105	43,7	25,7

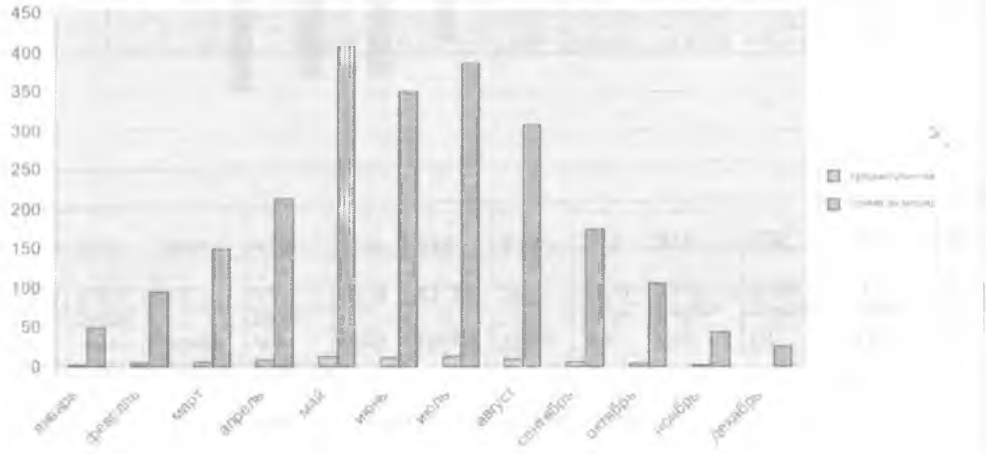
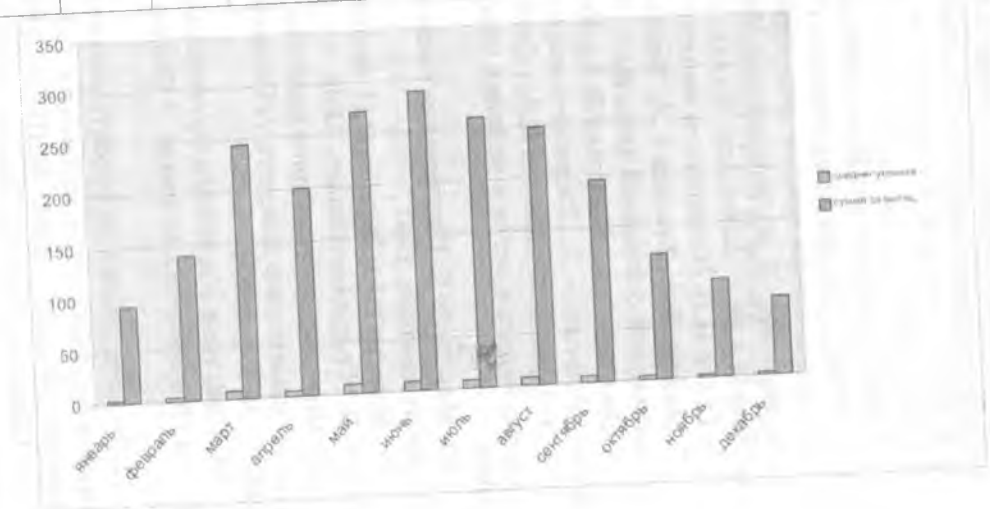


Таблица 11

Вид радиации	Рассеянная радиация											
месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Среднесуточная	2,99	4,86	7,9	6	8,8	9,7	8,5	8	6,5	3,9	3,14	2,43
Сумма за месяц	92,8	140	245	200	272	289	261	249	195	121	94,3	75,3



Список использованных источников

1. Андрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н.,Вашкевич К.П. и др. Ветроэлектрические станции. – Л.:Госэнергоиздат, 1960. – 319 с.

2. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения. – М.: Энергоиздат, 1982.

3. Бринкворт Б.Х. Солнечная энергия для человека. – М: Мир, 1976.

4. Ветроэнергетика: Новейшие разработки/Под ред. Д.де Рензо. – М: Энергоатомиздат, 1982.

5. Гидрогеотермические ресурсы юга и северо-востока Казахстана. Н.М. Бондаренко М.С. Ким, С.М.Мухаметжанов и др. – Алма-Ата: Наука, 1988. –127с.

6. Гулиа Н.В. Накопители энергии. – М: Наука, 1980.

7. Даффи Дж., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М: Мир, 1977.

8. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. и др. Климатология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 568 с.

9. Зубарев В.В. , Минин В.А. , Степанов И.Р. Использование энергии ветра в районах севера. – Л-д : Наука, 1989.

10. Мак-Вейг Д. Применение солнечной энергии. –М: Энергоатомиздат, 1981.

11. Маркус Т.А., Моррис Э.Н. Здания, климат и энергия. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 542 с.

12. Материалы семинара и международной конференции по изменению климата //Гидрология и экология. 1997. – № 3. – 254 с.

13. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. – Обнинск: ЦМП, 1992. – 31 с.

14. Рекомендации по проектированию установок солнечного горячего водоснабжения для жилых и общественных зданий. – Киев: ЗНИИЭП, 1987.– 118с.

15. Садыков. Использование энергии ветра. – Алма-Ата: Кайнар, 1961.

16. Справочник по климату СССР. Вып. 3. 43. Ветер. – Л: Гидрометеоиздат, 1966.

17. Справочник научно-прикладной по климату СССР, многолетние данные. Серия 3, выпуск 10, части 1-6. – Ленинград: Гидрометиздат, 1967. – 423 с.

18. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 389 с.

19. Тлеуов А.Х., Тлеуов Т.Х. Использование нетрадиционных видов энергии в Казахстане. – Алматы: Білім, 1998.

20. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М: Энергоатомиздат, 1991.

21. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. – М: Энергоатомиздат, 1983.

22. Фатеев Е.М.Ветродвигатели и ветроустановки. – М.: Сельхозиз, 1957.

Содержание

Введение 3
Глава 1. ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
1.1. Условия эффективного использования НВИЭ 6
1.2. Основные понятия и определения 7
1.3. Научные принципы использования ВИЭ 12
1.4. Технические проблемы использования возобновляемых источников энергии 17

Глава 2. РЕСУРСЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ И НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
2.1. Виды, основные направления использования НВИЭ, ВИЭ 22

Глава 3. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
3.1. Мировое потребление энергоресурсов 32
3.2. Опыт использования гелиоустановок за рубежом 38

Глава 4. ОСНОВЫ МЕТЕОРОЛОГИИ
4.1. Основные задачи метеорологии 55
4.2. Организация системы наблюдений и контроля за состоянием природной среды 59
4.3. Принципы построения гидрометеорологической сети 60
4.4. Схема строения атмосферы 64
4.5. Приборы для измерения солнечной радиации 70

Глава 5. СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
5.1. Солнце как источник излучения 77
5.2. Основные законы солнечной энергии 80
5.3. Космическое солнечное излучение 81
5.4. Составляющие излучения 84
5.5. Геометрия Земли и Солнца 88

Глава 6. ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
6.1. Классификация систем солнечного теплоснабжения 96
6.2. Солнечные системы для получения электроэнергии 115

Глава 7. КОЛЛЕКТОРЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ
7.1. Виды КСЭ и их конструкция 120
7.2. Теоретическая работа КСЭ 127
7.3. Испытания коллекторов солнечной энергии 132
7.4. Солнечная радиация, поглощаемая пластиной КСЭ 136
7.5. Почасовое поступление солнечной радиации 144
7.6. Оптимальная ориентация КСЭ 147
7.7. Повышение эффективности КСЭ 151
7.8. Расчет систем СТС (f-метод расчета СТС) 159

Глава 8. ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ
8.1. Понятие ветроэнергетики 163
8.2. Понятие о происхождении ветра 165
8.3. Характеристики ветровых потоков 167
8.4. Географические изменения скоростей ветра 175

Глава 9. СИСТЕМЫ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ
9.1. Классификация ветродвигателей по принципу их работы 189
9.2. Конструкция ветроустановок 198
9.3. Преимущества и недостатки различных систем ветродвигателей 204
9.4. Методика определения параметров ветроустановок 209
9.5. Основы теории использования энергии ветра 211
9.6. Коэффициент использования энергии ветра 213
9.7. Аэродинамические характеристики ветроагрегатов 213
9.8. Принцип работы ветроколеса 217
Приложение А 218
Приложение Б 230
Список использованных источников 240