

**Обозов А.Дж., Ботпаев Р.М**

## **ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

*Допущено министерством образования  
и науки Кыргызской Республики в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений.*

**Бишкек 2010**

УДК 621.221.2/4(07)

Подготовлено на кафедре возобновляемых источников энергии Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова.

Рецензенты:

докт.техн.наук, проф. Ураимов С.У.

докт.техн.наук, проф. Кенжаев И.Г.

канд.техн.наук, доц. Саньков В.И.

Возобновляемые источники энергии: учебное пособие для вузов/  
А.Дж.Обозов, Р. М.Ботпаев – Бишкек, изд. , 2010 г. – 218 с.

В учебнике систематизированы и изложены основные понятия и физические основы расчетов и выбора параметров технических средств, работающих на энергии солнца, ветра, малых водотоков, биомассы и низкопотенциальных источниках. Описаны принципы их работы, представлены различные схемы и конструктивные решения. Приведены примеры практического использования, особенности их работы и эксплуатации.

Учебник предназначен для студентов энергетических специальностей и других направлений, связанных с решением вопросов энергосбережения и охраны окружающей среды. Он так же может быть полезен для специалистов, аспирантов и широкого круга организаций и ведомств, занимающихся проектированием, изготовлением, монтажом и эксплуатацией энергетического оборудования, работающего на ВИЭ.

## Оглавление

### Оглавление

<i>Условные обозначения</i> .....	3
Предисловие.....	Ошибка! Закладка не определена.
ВВЕДЕНИЕ .....	Ошибка! Закладка не определена.
<b>ГЛАВА 1. ЭНЕРГИЯ</b> .....	<b>11</b>
1.1 Что такое энергия, энергоносители? .....	11
1.2 Источники энергий .....	14
1.3 Парниковый эффект .....	16
1.4 Вопросы для самопроверки .....	17
<b>ГЛАВА 2. СОЛНЦЕ - ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ</b> .....	<b>19</b>
2.1 Планета Солнце.....	19
2.2 Направление распространения прямого солнечного излучения .....	21
2.3 Приходящая солнечная радиация на наклонную поверхность .....	24
2.4 Средства и приборы измерения солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния .....	26
2.5 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач.....	31
<b>ГЛАВА 3. СОЛНЕЧНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ СИСТЕМЫ</b> .....	<b>35</b>
3.1 Солнечные тепловые системы и их компоненты.....	35
3.1.1 Виды солнечных коллекторов.....	36
3.1.2 Тепловой баланс и характеристики солнечного коллектора .....	43
3.1.3 Бак аккумулятор .....	46
3.1.4 Другие компоненты солнечного контура .....	51
3.2 Солнечные тепловые установки.....	56
3.3 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач.....	64
<b>ГЛАВА 4. ПАССИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ</b> .....	<b>67</b>
4.1 Понятие пассивные солнечные тепловые системы .....	67
4.2 Народные методы строительства. Традиционное жилье.....	67
4.3 Параметры и определения для пассивных домов .....	69
4.4 Главные климатические факторы .....	72
4.5 Компоненты пассивных солнечных систем .....	74
4.6 Системы пассивного отопления.....	77

4.7 Примеры пассивных солнечных систем.....	79
4.8 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач.....	82
<b>ГЛАВА 5. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ФОТОВОЛЬТАИК) .....</b>	<b>85</b>
5.1 Фотоэффект .....	85
5.2 Зонная теория. ....	86
5.3 Собственная и примесная проводимость полупроводников.....	87
5.4 Электроно-дырочные переходы.....	88
5.5 Фотоэлектрический элемент, фотоэлектрический модуль и батарея	89
5.6 Типы фотоэлементов .....	93
5.7 Вольтамперные характеристики (ВАХ) .....	94
5.8 Производство фотоэлементов.....	97
5.9 Фотовольтаик установки и их компоненты.....	98
5.10 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач.....	103
<b>ГЛАВА 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ .....</b>	<b>105</b>
6.1 Водные ресурсы .....	105
6.2 Гидроэнергетические установки и их типы.....	109
6.3 От водяного колеса к водяной турбине.....	131
6.4 Компоненты гидроэлектростанций.....	135
6.5 Гидрология - основа для проектирования ГЭС.....	141
6.6 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач.....	143
<b>ГЛАВА 7. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>144</b>
7.1 Энергия ветра .....	144
7.2 Использование энергии ветрового потока .....	147
7.3 Ветроустановки использующие силу сопротивления.....	149
7.4 Ветроустановки использующие подъемную силу .....	151
7.5 Конструкции ветроэнергетических установок .....	153
7.6 Регулирование мощности и аварийное выключение при ураганах.	158
7.7 Компоненты 3 лопастной ветроустановки .....	162
7.8 Подключения ветроустановок к электрическим сетям .....	164
7.9 Ветроферма.....	170
7.10 Вопросы для самоконтроля и примеры решения задач.....	172
<b>ГЛАВА 8. ЭНЕРГИЯ ИЗ БИОМАССЫ .....</b>	<b>174</b>



<b>8.1 Преобразование энергии биомассы .....</b>	<b>174</b>
<b>8.2 Твердое биотопливо .....</b>	<b>175</b>
<b>8.3 Жидкое биотопливо .....</b>	<b>178</b>
<b>8.4 Газообразное биотопливо .....</b>	<b>180</b>
<b>8.4.1 Этапы анаэробного сбраживания .....</b>	<b>180</b>
<b>8.4.2 Условия для анаэробного сбраживания.....</b>	<b>182</b>
<b>8.4.3 Влияние исходного материала на выход газа .....</b>	<b>186</b>
<b>8.4.4 Состав биогаза .....</b>	<b>187</b>
<b>8.4.5 Шлам – лучшее удобрение .....</b>	<b>189</b>
<b>8.4.6 Компоненты биогазовой установки.....</b>	<b>191</b>
<b>8.4.7 Технологические схемы биогазовых установок .....</b>	<b>196</b>
<b>8.5 Вопросы и примеры решения задач .....</b>	<b>201</b>
<b>ГЛАВА 9. ТЕПЛОВОЙ НАСОС .....</b>	<b>203</b>
<b>9.1 Понятие тепловой насос .....</b>	<b>203</b>
<b>9.2 Компрессионные тепловые насосы .....</b>	<b>204</b>
<b>9.3 Абсорбционные тепловые насосы .....</b>	<b>207</b>
<b>9.4 Адсорбционные тепловые насосы .....</b>	<b>209</b>
<b>9.5 Величины характеризующие тепловой насос.....</b>	<b>209</b>
<b>9.6 Компоненты теплового насоса. ....</b>	<b>210</b>
<b>9.6 Низко потенциалные источники энергий для теплового насоса....</b>	<b>213</b>
<b>9.7 Применение тепловых насосов .....</b>	<b>215</b>
<b>9.8 Вопросы и примеры решения задач. ....</b>	<b>216</b>

## Условные обозначения

- $A$  - площадь солнечного коллектора, м<sup>2</sup>  
 $A_p$  - произведенная работа системой, Дж  
 $a$  - переводный множитель актинометра, ккал/см<sup>2</sup>  
 $C_{\max}$  - максимальная теоретическая концентрация солнечной энергии  
 $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  скорость света в вакууме, м/с  
 $C_n$  - коэффициент подъемного сопротивления  
 $c_{\text{воды}}$  - удельная теплоемкость воды, кДж/кг·К  
 $c_{v, \text{воды}}$  - объемная теплоемкость воды, кДж/м<sup>3</sup>·К  
 $E$  - энергия фотона, Дж  
 $E_g$  - кинетическая энергия ветра, Дж  
 $E_g$  - ширина запрещенной зоны, эВ  
 $f_{\text{сол}}$  - солнечное замещения, %  
 $G_c = 1353$  солнечная постоянная, Вт/м<sup>2</sup>  
 $G_{\text{diff}}$  - диффузная или рассеянная солнечная радиация, Вт/м<sup>2</sup>  
 $G_{\text{dir}}$  - прямая солнечная радиация, Вт/м<sup>2</sup>  
 $G_{\text{gl}}$  - суммарная солнечная радиация, Вт/м<sup>2</sup>  
 $G_{\text{ref}}$  - отраженная солнечная радиация, Вт/м<sup>2</sup>  
 $g$  - коэффициент пропускания энергии  
 $g_z = 9,81$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>  
 $H_{\text{зэс}}$  - напор, разность уровней верхнего и нижнего бьефов, м  
 $I_D$  - ток насыщения в запирающем направлении диода, А  
 $I_{\text{фт}}$  - фототок, А  
 $m$  - фактор диода  
 $m_g$  - масса воздушного потока, кг  
 $m_{\text{воды}}$  - масса воды, кг  
 $N$  - мощность системы, Вт  
 $N_z$  - отсчет гальванометра (отклонение стрелки от нулевого положения)  
 $N_{\text{ни}}$  - мощность низкопотенциального источника, Вт  
 $N_{\text{пол}}$  - мощность полезной энергии, Вт  
 $N_{\text{эл}}$  - мощность электрического привода на тепловой насос, Вт  
 $n$  - частота вращения ветроколеса, об/мин  
 $n_c$  - частота вращения поля статора, об/мин  
 $n_p$  - частота вращения ротора, об/мин  
 $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$  - постоянная Планка, Дж·с

$k$  - коэффициент пропорциональности приходящей солнечной радиации,  $A \cdot m^2 / Bt$

$Q_{\text{воды}}$  - запасенная энергия в воде, кДж

$Q_{\text{зэс}}$  - расход воды через турбину,  $m^3/c$

$Q_{\text{кол}}$  - количество тепловой энергии, полученное солнечной установкой, кВт·час

$Q_{\text{ни}}$  - количество энергии, полученное от низкотемпературного низкопотенциального источника, кВт·час

$Q_{\text{пол}}$  - полезная энергия, отданная потребителю, кВт·час

$Q_{\text{топка}}$  - количество тепловой энергии, полученное за счет дополнительной топки, кВт·час

$Q_{\text{эл}}$  - количество энергии для питания компрессора, кВт·час

$q_i$  - коэффициент вторичной теплоотдачи

$T_{\text{абс}}$  - температура абсорбера солнечного коллектора, К

$r$  - радиус площади, ометаемой ветроколесом, м

$T_{\text{окр}}$  - температура окружающей среды, К

$T_{\text{неба}}$  - температура небосвода над солнечным коллектором, К

$\Delta T_{\text{воды}}$  - разница температур воды, К

$t$  - промежуток времени, с

$U_D$  - напряжение на элементе, В

$U_m$  - коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора за счет конвекции и теплопередачи при заданной скорости ветра,  $Bt/m^2 \cdot K$

$U_{\text{мен}}$  - обобщенный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора,  $Bt/m^2 \cdot K$

$U_{\text{тмп}}$  - температурное напряжение, В

$V_{\text{воды}}$  - объем воды,  $m^3$

$V_{\text{пр}}$  - объем, связанный с возможным парообразованием теплоносителя в результате остановки циркуляционного насоса,  $m^3$

$V_{\text{рас}}$  - объем, связанный с тепловым расширением теплоносителя в солнечном контуре,  $m^3$

$V_{\text{рб}}$  - объем расширительного бака,  $m^3$

$V_{\text{рез}}$  - резервный объем, поддерживающий работу расширительного бака при больших давлениях,  $m^3$

$V_{\text{кол}}$  - объем теплоносителя в солнечном коллекторе,  $m^3$

$V_{\text{сол.к.}}$  - объем теплоносителя в солнечном контуре,  $m^3$

$W$  - объем речного стока,  $m^3$

$x_o$  - осадки, мм

$y$  - речной сток, мм

$z_{ис}$  - испарение, мм

$\alpha$  – угол атаки для ветроколеса, град.

$\alpha_{воз}$  - коэффициент теплоотдачи от воздуха помещения внутренней поверхности стены,  $Вт/м^2 \cdot К$

$\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности стены в окружающий воздух,  $Вт/м^2 \cdot К$

$\beta$  - масштабный параметр (Scale Parameter) распределения скорости ветра по формуле Вейбулла

$\delta_{ст}$  - толщина одной из прослоек (штукатурка, кирпич и т.д.) стены, м

$\varepsilon_{абс}$  - коэффициент эмиссии абсорбера солнечного коллектора

$\gamma$  - параметр формы распределения скорости ветра по формуле Вейбулла

$\eta_0$  - оптический КПД солнечного коллектора

$\eta_{эс}$  - общий КПД гидроэлектростанции

$\eta_k$  - коэффициент полезного действия солнечного коллектора

$\lambda$  - длина волны, м

$\lambda_{ст}$  - коэффициент теплопроводности для прослойки стены,  $Вт/м \cdot К$

$\nu$  - частота волны, 1/с

$V$  - скорость ветра, м/с

$\rho_{воды}$  - плотность воды,  $кг/м^3$

$\rho_{гор}$  - плотность теплоносителя в нагретом состоянии,  $кг/м^3$

$\rho_{хол}$  - плотность теплоносителя в холодном состоянии,  $кг/м^3$

$\pi = 3,14$  - отношение длины окружности к диаметру

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

$U_c$  - скорость струи воды из сопла, м/с

$\zeta$  - отношение коэффициентов поглощения (абсорбции) к излучению абсорбера

$\Theta_s = 0,16$  – полуугол, под которым с Земли наблюдается солнечный диск, град

КОП - коэффициент преобразования

$\Phi H$  – фактор наполнения солнечного модуля

## Предисловие

Прогресс в современном человеческом обществе невозможен без активного потребления энергии, необходимой для успешного развития промышленности, сельского хозяйства и повышения уровня комфортности жизни. С научно-техническим прогрессом потребность в энергии резко возросла, особенно в быту, что связано с использованием огромного количества различных механизмов, приборов, оборудования, сопровождающих нас по всюду: это и бытовые приборы, оборудования малой механизации, радио- и телеаппаратура, различные электрические приспособления и т.д.

За последние десятилетия потребление энергии на душу населения возросло в десятки раз. В этой ситуации активное получение энергии за счет традиционных видов углеводородного топлива (уголь, газ, нефть) привело к резкому сокращению их запасов и одновременно к загрязнению окружающей среды. Многочисленные вредные выбросы в атмосферу стали причиной потепления климата, и, как следствие, это стало приводить к различным природным катаклизмам, как наводнения, исчезновение ледников, разрушительные ураганы и т.д.

Все это вместе потребовало поиска альтернативных нетрадиционных подходов к использованию энергии. К таким источникам энергии можно отнести энергию возобновляемых источников (солнца, ветра, геотермальная энергия, энергия биомассы, малых горных водотоков, энергия волн и т.д.) Это те источники, которые практически находятся повсеместно, экологически чистые и имеют огромный потенциал.

Пока этот потенциал используется недостаточно активно. Лишь в последние годы этим источникам энергии стало уделяться больше внимания и углубились научные исследования и разработки по созданию устройств, преобразующих энергию этих источников. Следует отметить, что в этом направлении уже достигнуты определенные результаты. Так, в области ветроэнергетики ряд стран (Дания, Голландия, Германия, США и др.) имеют ветроэнергетические фермы мегаваттных мощностей, а единичная мощность одного ветроагрегата доведена до 5 МВт. Активно используются солнечные установки как для получения электрической энергии, так и для теплоснабжения. Значительный прорыв сделан в области переработки и использования биомассы. Уже в ряде стран появились биодизельные заправки для автомашин в замен традиционного бензина. В некоторых странах Латинской Америки до 80% автотранспорта переведено на биотопливо, которым заправляют автомашины.

Рядом стран приняты национальные и региональные программы по активизации использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Так, странами Европейского союза принята программа - выйти к 2020 г. по замещению традиционного топлива энергией возобновляемых источников до 20% .

В сложившейся ситуации остро встают вопросы подготовки инженерных кадров, обладающих знаниями и навыками в вопросах проектирования, расчета и эксплуатации оборудования, работающего на ВИЭ. Поэтому во многих учебных заведениях стали готовить специалистов в этой области. В Кыргызской республике ряд ведущих вузов страны готовит и выпускает инженеров ВИЭ. Так, в Кыргызском Государственном Техническом Университете им. И. Раззакова (КГТУ), Кыргызско - Славянском (Российском) университете им. Б. Ельцина (КРСУ), Кыргызско - Узбекском университете (КУУ), Кыргызском Государственном Университете Строительства Транспорта и Архитектуры им.Н.Исанова (КГУСТА), Ошском технологическом университете (ОшТУ) имеются выпускающие кафедры ВИЭ. В ряде других университетов читаются курсы по ВИЭ. Несмотря на то, что имеется достаточное количество информации по исследованиям и разработкам в области ВИЭ, данной проблеме посвящено множество научных статей, монографий, книг, имеются уникальные пилотные проекты солнечных станций, ветроэнергетических ферм, геотермальных электро- и теплостанций, крайне редки учебники для студентов, где бы воедино были собраны и изложены основные принципы работы этих установок, представлены особенности и даны физические основы процессов преобразования и передачи энергии, рассмотрены методы расчета и проектирования оборудования.

В данном учебнике сделана попытка собрать такой материал, систематизировать и изложить физические и теоретические основы расчета и проектирования технических средств, работающих на ВИЭ, дать физические основы работы этих установок.

Материалы учебника базируются на многолетнем опыте, накопленном авторами при разработке и создании различных технических средств и оборудования, работающего на ВИЭ, практическом опыте проектирования и эксплуатации этих установок, а также опыте чтения лекций студентам энергетических специальностей по различным электротехническим дисциплинам.

Авторы выражают признательность в первую очередь сотрудникам КГТУ им.И.Раззакова, в частности, кафедрам «Возобновляемые источники энергии», «Теплотехника», «Электромеханика», лаборатории «Системы преобразования энергии возобновляемых источников», Национальной академии наук КР, работникам кафедр «ВИЭ», КРСУ и другим, оказавшим неоценимую помощь при написании данного учебника.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие энергетики и взаимосвязанных с ней вопросов экологии является одной из основных глобальных проблем в мире. Прогрессирующее исчезновение традиционного топлива, которое наблюдается повсеместно, вынуждает людей искать альтернативные решения. Угроза экологической катастрофы повышает требования к потребляемым источникам энергии, главным из которых является экологическая безопасность. В связи с этим внедрение технологий, использующих альтернативные источники энергии, является приоритетной задачей развития энергетики во многих странах мира.

Для того, чтобы развивать использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), необходимо иметь знания о них, знать основы этих современных технологий.

На ускоренное развитие и повсеместное внедрение технологий, утилизирующих возобновляемые источники энергии, оказывает влияние множество факторов. К таким многочисленным факторам можно отнести: информированность населения об имеющихся технологиях, тарифная политика на доступные энергоносители, законодательная база поддержки ВИЭ, наличие кадрового потенциала инженерно-технических работников и специалистов, занимающихся непосредственно разработкой, проектированием, монтажом и эксплуатацией установок.

Из этого многообразия факторов последний, связанный с подготовкой специалистов в области ВИЭ, является наиболее важными и основополагающим в деле практической реализации этих технологий в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве и частном секторе.

Следует отметить, что уже достаточно сделано в данном направлении: разработаны различные конструкции установок, работающих на солнечной, ветровой, геотермальной энергиях, энергии биомассы и технологии использования термальной массы земли и других многочисленных возобновляемых источниках. Интенсивно ведутся научные исследования. Написано множество научных монографий, статей. Эти вопросы обсуждаются на крупных международных форумах, конференциях симпозиумах. Появились фактически новые отрасли промышленности: как ветроэнергетика, гидроэнергетика, отрасль биотехнологий и т. д. В ряде промышленно развитых стран приняты законы и создана юридическая база для поддержки этих технологий и широко масштабного повсеместного практического применения.

В этих условиях появляется все большая потребность в специалистах, инженерах и проектировщиках, работающих в этом направлении.

Аналогичная тенденция наблюдается и в Кыргызской Республике, где в последние годы во многих высших учебных заведениях появились кафедры Возобновляемых источников энергии, а также вузы, в которых введены в учебный процесс дисциплины по ВИЭ для студентов энергетических специальностей. В республике накоплен определенный практический опыт в

проектировании и эксплуатации тепловых солнечных установок, ветроэнергетических устройств, микрогидроэлектростанций, биогазовых установок, для теплоснабжения жилых домов и помещений, приготовления пищи и получения высокоэффективных органических удобрений. Наличие многообразной литературы (научной, специальной, познавательной, огромного объема информации о технологиях по использованию ВИЭ в интернете) не позволяет студенту извлечь из этого огромного потока наиболее важную и необходимую информацию для получения основных знаний в области теории расчета, проектирования и эксплуатации технических средств и технологий, работающих на ВИЭ.

Настоящий учебник ставит перед собой задачу: на основе обобщения и анализа накопленного опыта представить наиболее важные и значимые аспекты теории расчета и выбора параметров проектируемых установок, изложить понимание физических основ и описать принципы работы преобразователей, работающих на энергии ВИЭ.

Конечно же, при изложении материала учебника авторы исходили из условий, что общеобразовательные технические дисциплины как теплотехника, электротехника, электроэнергетика, теоретические основы электроэнергетики, основы теплопередачи, гидравлики, тепло-массообмена и другие естественно технические дисциплины студенты проходят отдельно, поэтому ряд тонкостей, связанных с описанием методов расчета, имеющих закономерностей, основных понятий и т. д. в данном курсе не приводятся, считая, что этим знаниями студент уже обладает. Поэтому при изложении материала учебника основное внимание было уделено особенностям работы установок, физическим принципам преобразования, конструктивным и технологическим особенностям, присущим именно устройствам, работающим на ВИЭ.

Книга состоит из девяти основных разделов. В разделах, посвященных вопросам использования солнечной энергии, рассматриваются особенности парникового эффекта, дается понимание составляющих солнечного излучения и продолжительности солнечного сияния; описываются приборы, измеряющие эти параметры солнечной энергии, и указания по работе с ними. Достаточно подробно изложены сведения о солнечных установках для нужд теплоснабжения зданий и помещений. Рассматриваются различные возможные схемы и принципы их работы, вспомогательного оборудования: циркуляционные насосы, теплообменники, баки – аккумуляторы и др.

Отдельным разделом представлено пассивное солнечное отопление. В нем изложены методы расчета и проектирования домов. Даются практические рекомендации по использованию этих принципов при проектировании и строительстве. Показан ряд практических примеров. При рассмотрении солнечных фотоэлектрических преобразователей описывается явление фотоэффекта и раскрывается его физический смысл. Изложены основы зонной теории и принципы работы полупроводников. Даются основополагающие понятия фотоэлемента, фотоэлектрической панели, фотоэлектрической станции. Описана технология и производство их



изготовления, методика построения вольт – амперных и других характеристик.

В разделах гидроэнергетики в основном затронуты вопросы расчета и выбора параметров малых и микроГЭС. Рассмотрены различные конструкции турбин, их типы, особенности работы.

В области ветроэнергетики рассмотрены типы и виды ветроэнергетических установок, принципы их работы. Приводятся модели взаимодействия ветрового потока с ветроколесом и даны методы расчета установленной мощности ВЭУ. Дается понимание коэффициента отбора мощности, критерия Бетца и др. Обсуждаются особенности работы автономных ветроэнергетических установок (ВЭУ) и ветроэнергетических ферм, подключаемых к электрическим сетям.

В разделе использования энергии биомассы, наряду с описанием технологий получения твердого и жидкого биотоплива, достаточно подробно изложена та часть материала, которая связана с получением горючего биогаза и высокоэффективных органических удобрений на основе биогазовых установок. Здесь рассматриваются основные требования и условия работы установки, их классификация по принципу работы и конструктивным решениям. Рассматриваются вопросы температурных режимов и состава исходного биогаза. Приведены примеры практического использования и дано описание различных технологических схем.

Последний раздел книги посвящен вопросам использования энергии низкопотенциальных источников с помощью теплонасосных установок. Приводятся основные принципы работы теплонасоса. Описываются разновидности и типы насосов. Подробно изложены конструктивные особенности теплового насоса и его основных элементов. Показано влияние температуры низкопотенциального источника на эффективность работы теплонасоса и связь коэффициента преобразования с КПД. Достаточно широко представлен практический опыт использования теплонасосных установок для нужд теплоснабжения зданий и помещений.

Для более полного освоения материала в конце каждого раздела приведены контрольные вопросы для ответов и примеры решения тех или иных задач.

Изложение текста сопровождается рисунками и фотографиями, иллюстрирующими практическое использование установок, таблицами, диаграммами, графиками, на которых показаны основные физические процессы, происходящие в преобразователях, принципы работы и технические характеристики, определяющие уровень и качество создаваемых устройств.

Следует отметить, что в Кыргызской Республике предлагается такой учебник, в котором представлены физические основы, теория расчета и проектирование устройств, работающих на ВИЭ, закладывающий основу инженерных знаний для студентов соответствующих специальностей.

Материалы, представленные в учебнике, предназначены в первую очередь для специальностей «Нетрадиционные возобновляемые источники

энергии», а также других энергетических направлений, связанных с вопросами тепло- и электроснабжения, энергосбережения и охраны окружающей среды.

Кроме того, они могут быть также аспирантам, магистрам и широкому кругу специалистов, занимающихся вопросами проектирования, строительства, монтажа и эксплуатации установок, работающих на возобновляемых источниках энергии.

# ГЛАВА 1. ЭНЕРГИЯ

## 1.1 Понятия энергия, энергоносители

Понятие энергия знакомо каждому с раннего детства. Человечество для существования с давних пор использует различные формы энергии. В начале ограничивалось мускульной энергией, но с развитием потребности в энергии так же повышались. *Энергия - это способность системы совершать работу.* В природе существуют несколько видов энергии, часть которых перечислены в табл.1.1. [Reb02].

Табл. 1.1

Формы энергии (не полный список)

Форма энергии	Естественная форма	Расчет
Кинетическая энергия	Движение тел, жидкостей	$E_{кин} = \frac{mv^2}{2}$
Потенциальная энергия	Энергия положения	$E_{пот} = mgh$
Электрическая энергия	Протекание электричества	$E_{эл} = U \cdot I \cdot \Delta t$
Энергия электромагнитных волн	Энергия микроволн, радио волн, теплового излучения	$E = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$
Тепловая энергия	Внутренняя энергия, энтальпия (Тепло)	$E_{теп} = mc\Delta T$
Энергия деления ядра		$E_{дяд} = AB$
Энергия синтеза ядра		$E_{сы} = AB$

Для оценки многообразных форм энергии соответственно применяются различные единицы измерения. Из школьной физики известно, что 1 Дж (Джоуль) это механическая работа силы в 1 Н (Ньютон) при перемещении тела на расстояние 1 м (метр) в направлении действия силы:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.1)$$

В электротехнике используется Вт час (Ватт час) или чаще встречается кВтчас (1 кВтчас=3,6 МДж) и применяется, в частности, для учета электроэнергии.

Калория (1 кал=4,1868 Дж) – наиболее употребляемая единица измерения тепловой энергии. 1 кал -это количество энергии, необходимой для нагревания 1 г воды при нормальном давлении (0,1 МПа) с 14,5 °С до 15,5 °С.

В квантовой физике для оценки энергии частиц применяется электронвольт (1 эВ = 1,60219 · 10<sup>19</sup> Дж). Электронвольт - это энергия, которую приобретает заряженная частица, несущая один элементарный заряд (заряд электрона), при перемещении в электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов в 1 В.

Следует отметить еще одну часто употребляемую единицу измерения запасенной химической энергии традиционного органического топлива как уголь и нефть, которую называют эквивалентом условного топлива (у.т.).

Теплота сгорания одного килограмма условного топлива равна 29,307 МДж или 7000 ккал. Эта единица применяется для сопоставления различных видов топлива и при составлении его суммарного учета.

В табл.1.2. приведены переводные коэффициенты описанных единиц измерения многочисленных форм энергии.

Табл.1.2

Перевод единиц измерения энергии

	Дж	кВтчас	Кал	эВ	у.т.
Дж	1	$2,778 \cdot 10^{-7}$	0,2388	$6,241 \cdot 10^{18}$	$3,413 \cdot 10^{-8}$
кВтчас	$3,6 \cdot 10^6$	1	$8,597 \cdot 10^5$	$2,247 \cdot 10^{25}$	0,1229
кал	4,187	$1,163 \cdot 10^{-6}$	1	$2,614 \cdot 10^{19}$	$1,429 \cdot 10^{-6}$
эВ	$1,60219 \cdot 10^{19}$	$4,451 \cdot 10^{-26}$	$3,826 \cdot 10^{-20}$	1	
у.т.	$29,307 \cdot 10^6$	8,14	$7 \cdot 10^6$		1

С понятием энергия тесно взаимосвязано другое, не менее важное понятие - мощность. Очень важно различать оба понятия (мощность и энергия) и знать их физическое отличие. *Мощность – это величина произведенной работы в единицу времени:*

$$N = \frac{A_p}{t}, \quad (1.2)$$

где  $N$  - мощность системы, Вт;  $A_p$  - произведенная системой работа, Дж;  $t$  - промежуток времени, с.

К примеру, Вы открываете входную дверь, при этом Вами совершается работа с определенной мощностью. Если вы эту же дверь открываете в два раза быстрее, то соответственно затрачиваете в два раза меньше времени на совершение идентичной работы, при этом приложенная мощность увеличивается в два раза.

**Энергоноситель.** Под энергоносителем понимается вещество, преобразовав которое можно получить полезную энергию. От степени преобразования различают первичные, вторичные и конечные энергоносители.

*Первичные энергоносители* – это те естественные энергоносители, которые еще не подвергались технической обработке. Например, первичная энергия ветра, солнца или первичные энергоносители-каменный и бурый уголь, нефть, энергия биомассы.

*Вторичные энергоносители* – это энергоносители, которые подверглись технической обработке и были получены из первичных или вторичных энергоносителей. Например, бензин, дизель, электроэнергия, рапсовое масло.

*Конечная энергия* – это форма энергии, в которой подводится потребителю. В качестве примера можно взять электроэнергию, газ, тепло, подведенные к дому.

В настоящее время одним из самых высококачественных форм энергии является электроэнергия. Основное преимущество электроэнергии является ее возможное преобразование в любую другую форму энергии!

## 1.2 Источники энергии

В качестве источника энергии в мире широкое распространение получили углеводородные топлива (уголь, нефть и газ). Однако, разведанные мировые запасы традиционного углеводородного топлива, по оценкам экспертов, способны удовлетворить мировую потребность лишь на следующие 60 лет! Поэтому в настоящее время приоритетной задачей является освоение новых источников энергии. Все известные источники энергии на земле можно условно разделить на два вида:

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

б) *возобновляемые источники энергии* – это источники энергии на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Типичный пример такого источника – солнечное излучение с характерным периодом повторения - 24 часа. *Возобновляемая энергия* присутствует в окружающей среде в виде энергии, *не являющейся следствием целенаправленной деятельности человека*, и это является ее отличительным признаком [ТВА90].

Возобновляемые источники энергии разделяют на три основные вида:

- а) *солнечное излучение;*
- б) *движение и притяжение планет;*
- в) *геотермальная энергия.*

Благодаря естественным преобразованиям энергии в последствии возникают такие формы энергии как ветер, осадки, волны, из которых также извлекается полезная энергия. Для того, чтобы «извлечь» энергию, необходимы для каждой формы энергии своеобразные технологии (рис.1.1) [BMW95].

*Геотермальная энергия* – это энергия в виде тепла, запасенная в недрах земли. Температура ядра земли достигает 6700 °С, более 99% Земли горячее 1000 °С, 0,9% горячее 100 °С [Fun08]. Подобные высокие температуры являются результатом радиоактивного распада, происходящего внутри земли. Содержание энергии тепла в земной коре с глубиной резко возрастает.



Рис.1.1 Виды возобновляемых источников энергии

*Энергия движения и притяжения планет* - различные планеты, в особенности Луна, гравитационно взаимодействуют с Землей.

Жидкость в океанах удерживается на поверхности вращающейся Земли силами гравитации. Гравитационное же взаимодействие Земли с Луной и Солнцем возмущает эти силы, образуя приливы. Приливная энергия, снятая с турбин приливных электростанций, через которые протекает вода в процессе приливов, отбирает часть кинетической энергии вращающейся Земли. Если задействовать во всем мире все значительные места с достаточно высокими приливами, то, согласно расчетам, это приведет к сокращению периода вращения земли на одни сутки за 2000 лет (это не так уж страшно для окружающей среды).

*Энергия Солнца* – является самым большим запасом возобновляемой энергии. За год Земля получает около  $3,9 \cdot 10^{24} \text{ Дж} = 1,08 \cdot 10^{18} \text{ кВт} \cdot \text{час}$

солнечного излучения, это в 10000 раз больше ежегодной потребности человечества в энергии и намного превосходит мировые запасы углеводородного и ядерного видов топлива. Если человечество сможет использовать хотя бы одну десятитысячную часть от приходящей солнечной радиации, то можно было бы на 100% покрыть современную потребность энергии за счет солнца (рис.1.2) [Qua07].

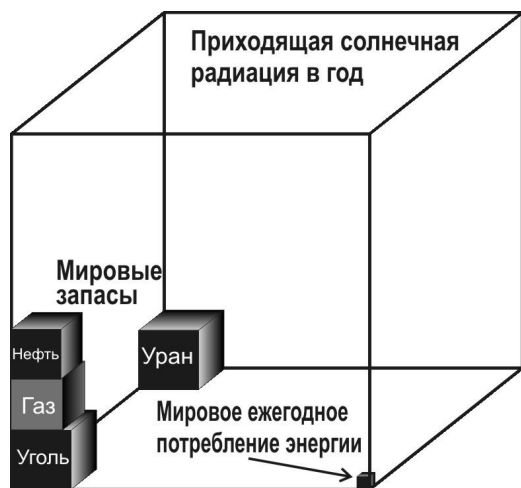


Рис.1.2 Суммарная приходящая солнечная радиация, мировые запасы топлива и ежегодное мировое потребление энергии

Различают прямое и косвенное использование солнечной энергии. Прямое использование солнечной энергии - это использование падающей солнечной радиации. При косвенном использовании солнечной радиации – энергия солнца, благодаря естественным преобразованиям, превращается в другие формы энергии: энергия ветра, воды или рост биомассы. Преобразование косвенных форм солнечной энергии можно осуществить с помощью различных технических установок.

### 1.3 Парниковый эффект

С понятием парниковый эффект у многих возникает ассоциации с повышением температуры, глобальным изменением климата или другими подобными явлениями.

*Парниковый эффект* – это естественный физический эффект, заключающийся в том, что исходящее от поверхности Земли тепло сохраняется в слоях атмосферы, что приводит к увеличению температуры окружающей среды.

Различают *естественный (природный) и антропогенный парниковые эффекты*. Благодаря естественному парниковому эффекту - возможна жизнь на земле. Если бы отсутствовали так называемые парниковые газы, то планета земля за ночь могла бы покрыться льдом. Парниковые газы играют важную роль, помогая сохранить часть энергии, излучаемой землей. Парниковые газы (углекислый газ, метан и др.), а также водяной пар препятствуют длинноволновому (инфракрасному) излучению в космос.

Вся уникальность процесса заключается в том, что солнечное излучение, дошедшее до земли, представляет собой спектр длины волн в диапазоне  $0,29 \div 2,5$  мкм, по-другому его называют коротковолновым излучением. Последнее излучение практически беспрепятственно проходит слои атмосферы с парниковыми газами (рис.1.3) [Qua07] и поглощается предметами на земле. При этом, солнечная энергия преобразуется в



тепловую, что приводит к нагреву предметов. Нагретые солнечными лучами предметы, излучают электромагнитные волны в диапазоне инфракрасного спектра, иначе его называют длинноволновым излучением  $3 \div 40 \text{ мкм}$ . Парниковые газы не прозрачны для теплового длинноволнового излучения, тем самым образуя «щит» и препятствуя прохождению излучения в космос.

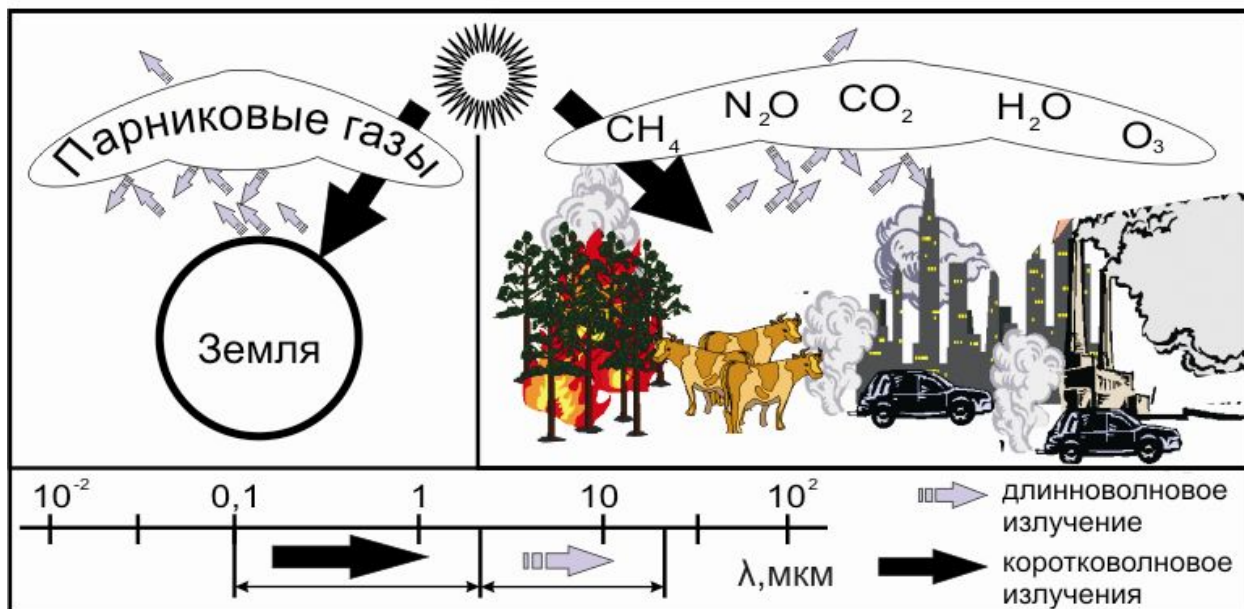


Рис.1.3 Возникновение парникового эффекта на земле

Таким образом, происходит частичное сохранение энергии, что позволяет сохранить жизнь на земле. Однако, в последнее время усилился антропогенный парниковый эффект, который является следствием прогресса в развитии человечества и увеличения потребления ископаемого топлива. В результате этого в атмосфере увеличилась концентрация углекислого газа, метана и других парниковых газов, что привело к нарушению радиационного баланса атмосферы, и как следствие к глобальному потеплению.

Принцип парникового эффекта используется в солнечных коллекторах, а также солнечных теплицах.

#### 1.4 Вопросы для самопроверки

1. Что такое энергия?
2. Какие виды энергии Вы знаете?
3. Чем отличается мощность от энергии?
4. Перечислите основные виды невозобновляемых источников энергии.
5. Что такое возобновляемые источники энергии?
6. Основные виды возобновляемых источников энергии.
7. Что такое парниковый эффект?



*Задача №1.* Солнце является самым большим запасом возобновляемой энергии. За год Земля получает около  $3,9 \cdot 10^{24}$  Дж =  $1,08 \cdot 10^{18}$  кВт · час энергии. Оцените среднюю мощность данного источника.

*Решение:*

1. Принимая 1 год равный 8760 часам, из формулы (1.1) мощность рассчитывается:

$$N = \frac{A_p}{t} = \frac{1,08 \cdot 10^{18}}{8760} = 123,3 \cdot 10^{12} \text{ (кВт)}.$$

*Задача №2.* Сравните номинальные стоимости за 1 кВт·час энергии различных энергоносителей, приведенных в табл.1.2. Стоимость на энергоносители принять равными тарифам 2010 года для КР.

Табл.1.2

Характеристика и стоимость энергоносителей по ценам 2010 г.

Энергоноситель	Ед. измерения	Стоимость	Удельная теплота сгорания
Природный газ	м <sup>3</sup>	0,3 \$/м <sup>3</sup>	33080 кДж/м <sup>3</sup>
Уголь	Кг	0,0554 \$/кг	22000 кДж/кг
Электричество	кВт час	0,015 \$/кВт час	

*Решение:*

1. Для сравнения приведенных в таблице источников энергии рассчитаем стоимости энергоносителей за 1 кВт·час энергии (1 кВт·час=3,6 МДж):  
 Стоимость газа :  $0,3 \cdot 3600 / 33080 = 0,032$  (\$/кВт час);  
 Стоимость угля :  $0,0554 \cdot 3600 / 27000 = 0,009$  (\$/кВт час).

## ГЛАВА 2. СОЛНЦЕ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

### 2.1 Планета Солнце

*Солнце* - это центральная планета нашей солнечной системы. На протяжении 5 млрд. лет солнце излучает энергию, благодаря которой возможна жизнь на Земле. Солнце состоит на 80% из водорода, 20% гелия и 0,1% других элементов. В табл. 2.1 приведены основные параметры Солнца и Земли [Qua07].

Табл. 2.1.

Габариты Солнце и Земли

Параметр	Солнце	Земля	Соотношение (З:С)
Диаметр, км	1392520	12756	1:109
Окружность, км	4372097	40075	1:109
Площадь поверхности, км <sup>2</sup>	$6,0874 \cdot 10^{12}$	$5,101 \cdot 10^8$	1:11934
Объем, км <sup>3</sup>	$1,4123 \cdot 10^{18}$	$1,0833 \cdot 10^{12}$	1:1303670
Масса, кг	$1,9891 \cdot 10^{30}$	$5,9742 \cdot 10^{24}$	1:332946
Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	1,409	5,516	1:0,26
Ускорение свободного падения м/с <sup>2</sup>	274	9,81	1:28
Температура поверхности, К	5777	288	1:367
Температура центра, К	15000000	6700	1:2200

Энергия солнечного излучения образуется в результате процесса ядерного синтеза, происходящего на Солнце. Около 650 млн. тонн водорода расплавляются в 645,7 млн. тонн гелия за одну секунду. При этом потеря массы в 4,3 млн. т/сек выделяется в виде энергии, мощность  $E$  (Вт) которой:

$$E = mc^2 = 4,3 \cdot 10^9 \cdot (2,99792458 \cdot 10^8)^2 = 3,845 \cdot 10^{26}, \quad (2.1)$$

где  $m = 4,3 \cdot 10^9$  потеря массы, кг/с;  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  скорость света, м/с.

Как видно, солнцем излучается непрерывно огромный поток энергии.

*Плотность потока солнечной радиации, расположенного над атмосферой, называется солнечной постоянной и принимается равной  $G_c = 1353 \text{ Вт/м}^2$ .* Плотность потока излучения, достигающего верхней границы атмосферы, отличается от солнечной постоянной вследствие флуктуаций потока солнечной энергии менее чем на  $\pm 1,5\%$ , и вследствие изменения расстояния Земля-Солнце, вызванных слабой эллиптичностью земной орбиты, на  $\pm 4\%$  в течение года [Даф77].

**Солнечное излучение на земной поверхности.** Солнечная энергия достигает атмосферы в виде направленного потока солнечного излучения. Проходя сквозь земную атмосферу, мощность потока солнечной радиации

уменьшается за счет рассеивания и атмосферного поглощения (в основном  $O_3, H_2O, O_2, CO_2$ ) [Qua07].

Под *рассеиванием* понимается отклонение солнечного излучения от первоначального направления. Рассеивание молекулами воздуха, водяным паром и частицами пыли приводит к ослаблению прямого солнечного излучения.

Молекулы воздуха очень малы по сравнению с длинами волн излучения, преобладающими в спектре солнечной энергии. Рассеивание этого излучения происходит в соответствии с *теорией Рэлея*. Влияние рассеивания Рэлея увеличивается с уменьшением длин волны.

Частицы пыли рассеивают солнечное излучение. Мун получил выражение для пропускательной способности воздуха, поэтому нередко в зарубежной литературе рассеивание частицами пыли называют *рассеиванием Муна* (Mie-Streuung). Частицы пыли намного крупнее молекул воздуха и их концентрация изменяется в зависимости от местоположения, высоты и времени. Чистые горные районы менее подвержены *рассеиванию Муна*, промышленные города-значительно.

- атмосферное поглощение

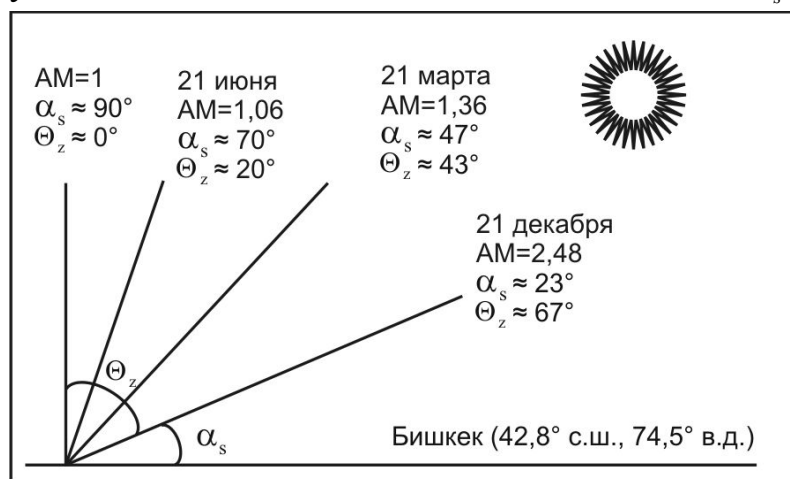
Солнечное излучение (внеземное излучение), падающее по нормали к земной атмосфере, имеет спектральное распределение, показанное на рис.2.2 при значении массы атмосферы  $AM=0$ .

*Массой атмосферы (атмосферная масса) AM называется длина пути излучения в атмосфере; длина пути по вертикали, отсчитываемая от уровня моря, принимается равной единице, а значение массы атмосферы в космосе принимается за нуль.* Таким образом, на уровне моря, когда Солнце находится в Зените (т.е. прямо над головой),  $AM=1$ ;  $AM=2$  равно, когда зенитный угол равен  $60^\circ$ . Масса атмосферы определяется:

$$AM = \frac{1}{\sin \alpha_s} = \frac{1}{\cos \Theta_z} \quad (2.2)$$

где  $\alpha_s$  – высота солнцестояния, град;  $\Theta_z$  - зенитный угол, град. Зенитный

угол и высота солнцестояния взаимосвязаны:  $\alpha_s + \Theta_z = 90^\circ$ .



На рис. 2.1 представлены сезонные изменения массы атмосферы для города Бишкек (КР). Во время летнего солнцестояния 21 июня  $AM=1,06$ ; зимнего 21 декабря  $AM=2,48$ .

Рис.2.1 Сезонное изменение массы атмосферы  $AM$  для г. Бишкек (КР)

Рентгеновские и другие типы ультракоротковолнового излучения в солнечном спектре поглощаются высоко в ионосфере азотом, кислородом и другими составляющими атмосферы. При длинах волн более 2,5 мкм слабое внеземное излучение интенсивно поглощается углекислым газом и водой, так что только небольшая часть солнечной энергии достигает земли.

Важно отметить, что, с точки зрения применения солнечной энергии на Земле, следует учитывать только излучение в интервале  $0,29 \div 2,5$  мкм [Даф77]. Солнечное излучение состоит на 7% из ультрафиолетового, 47% - видимого и на 46% - инфракрасного (теплого) излучения. Ультрафиолетовое излучение является фактором деградации для многих материалов, и значительная его часть отфильтровывается слоем озона в верхнем атмосферном слое. Водяной пар сильно поглощает в полосах инфракрасной области спектра (рис.2.2) [Даф77]. При значениях длины волны более 2,3 мкм пропускательная способность атмосферы очень низка вследствие поглощения водяным паром и углекислым газом. Энергия спектра внеземного солнечного излучения составляет менее 5% полной энергии солнечного спектра, так что энергия излучения, дошедшего до поверхности Земли, мала.

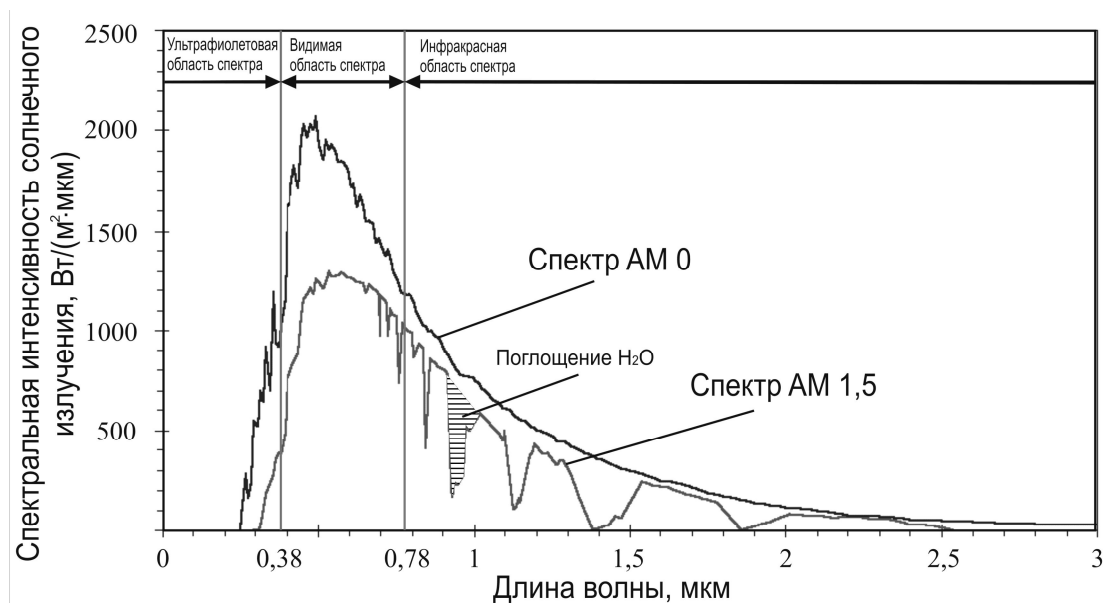


Рис.2.2 Спектральная интенсивность солнечного излучения при значениях массы атмосферы  $AM=0$  и  $AM=1,5$ .

## 2.2 Направление распространения прямого солнечного излучения

Угол падения солнечного излучения ( $\Theta$ ) является одним из основных углов, необходимых для расчета любой солнечной системы [Даф77]. Его можно вычислить, зная другие геометрические соотношения, описывающие положение плоскости, определенным образом ориентированной относительно Земли в какой-либо момент времени (независимо, от того

подвижна эта плоскость или перемещается вокруг Земли), и прямого солнечного излучения. Эти углы следующие:

$\Theta$  - угол падения солнечной радиации  $0^\circ \leq \Theta \leq 90^\circ$ . Угол между направлением излучения и нормалью к воспринимающей поверхности;

$\Theta_z$  - зенитный угол  $0^\circ \leq \Theta_z \leq 90^\circ$ . Угол между направлением на Солнце и вертикалью (нормалью к горизонтальной поверхности). Если угол наклона поверхности  $\alpha = 0$ , то  $\Theta = \Theta_z$ ;

$\varphi$  - широта местности  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ , принимается положительной для северного полушария;

$\alpha$  - угол наклона  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ , угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной поверхностью;

$\gamma$  - азимутальный угол плоскости  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ , отклонение нормали к плоскости от местного меридиана (для северного полушария за начало отсчета принимается южное направление, отклонение к востоку считается положительным, к западу отрицательным);

$\gamma_s$  - азимутальный солнечный угол  $0^\circ \leq \gamma_s \leq 360^\circ$ , угол между проекцией солнечного излучения и направлением на север;

$\omega$  - часовой угол  $-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$ , равный нулю в солнечный полдень; каждый час соответствует  $15^\circ$  долготы, причем значение часового угла до полудня считается положительным, а после полудня отрицательным ( $\omega = 0$  в солнечный полдень,  $\omega = 15^\circ$  и  $\omega = -15^\circ$  соответственно в 11.00 и в 13.00 по солнечному времени);

$\alpha_s$  - высота солнцестояния  $-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$ , т.е. угол между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью  $\alpha_s = 90^\circ - \Theta_z$ ;

$\delta$  - угол склонения,  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ , угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора (положительное для северного полушария). Солнечный полдень наступает в 12.00 часов по солнечному времени. Солнце в солнечный полдень находится в наивысшем положении для данного дня.

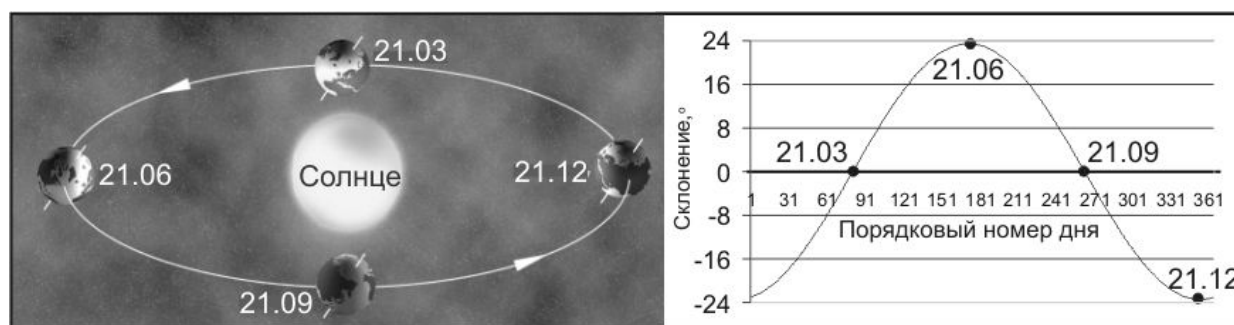


Рис.2.3 Изменения угла солнечного склонения в течение года

Земля вращается вокруг Солнца за период, равный одному году. Угол между направлением к Солнцу и экваториальной плоскостью угол склонения является переменной величиной и для северного полушария плавно

изменяется от  $23,45^\circ$  в период летнего солнцестояния до  $-23,45^\circ$  в период зимнего солнцестояния. Но не следует путать с углом наклона оси вращения Земли к плоскости Эклиптики, который в пространстве остается фиксированным и равным  $23,45^\circ$ . Угол солнечного склонения  $\delta$  определяется по монограммам или по аналитической формуле Купера:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \left(\frac{284 + n}{365}\right)\right), \quad (2.3)$$

где  $n$  – порядковый номер дня в году (для 1 января  $n=1$ , для 1 февраля  $n=32$  и т.д.). На рис.2.3 [Wag05] представлено изменение солнечного склонения в зависимости от  $n$ .

Соотношение между углом падения прямого солнечного излучения и другими углами можно записать в следующем виде:

$$\cos \Theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega. \quad (2.4)$$

Угол падения солнечной радиации необходимо знать для проектирования солнечных установок. Из оптики известно, что угол падения равен углу отражения. В гелиотехнике с энергетической стороны предпочтительно, чтобы угол падения приближался к нулю.

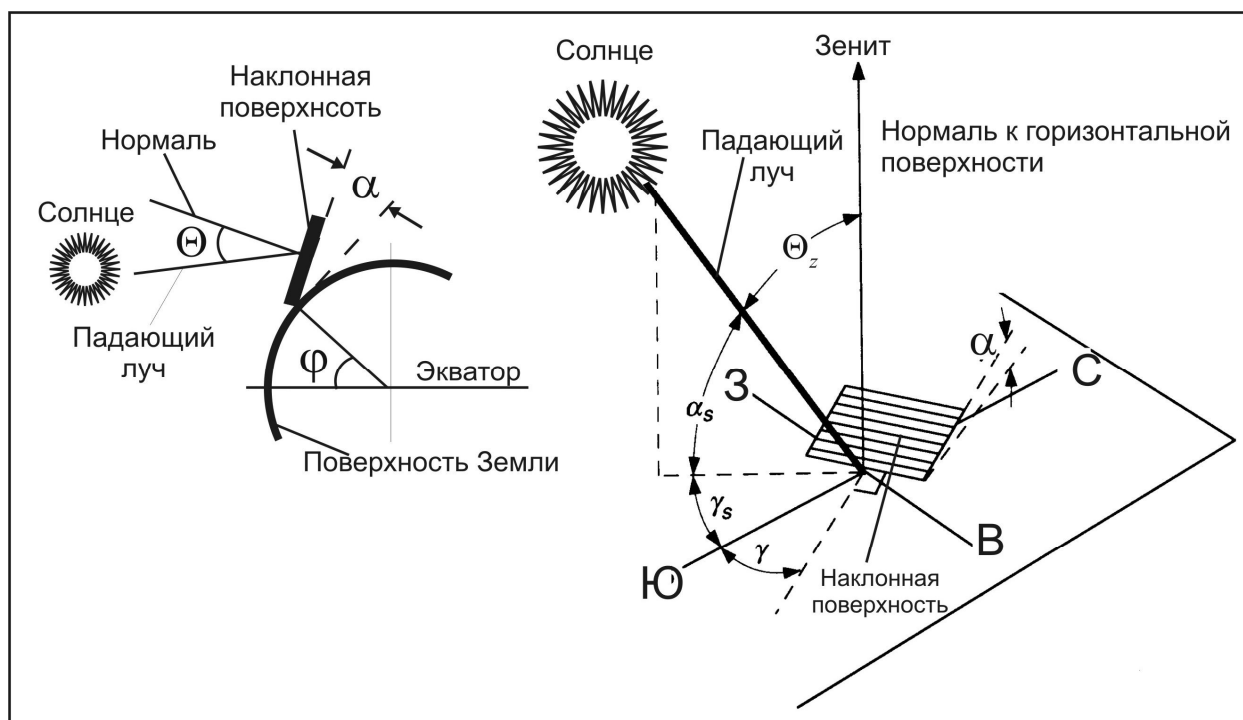


Рис. 2.4. Геометрические углы и связи солнца с землей

Для оценки положения солнца выбранного дня и любого времени используется *диаграмма траектории солнца*.

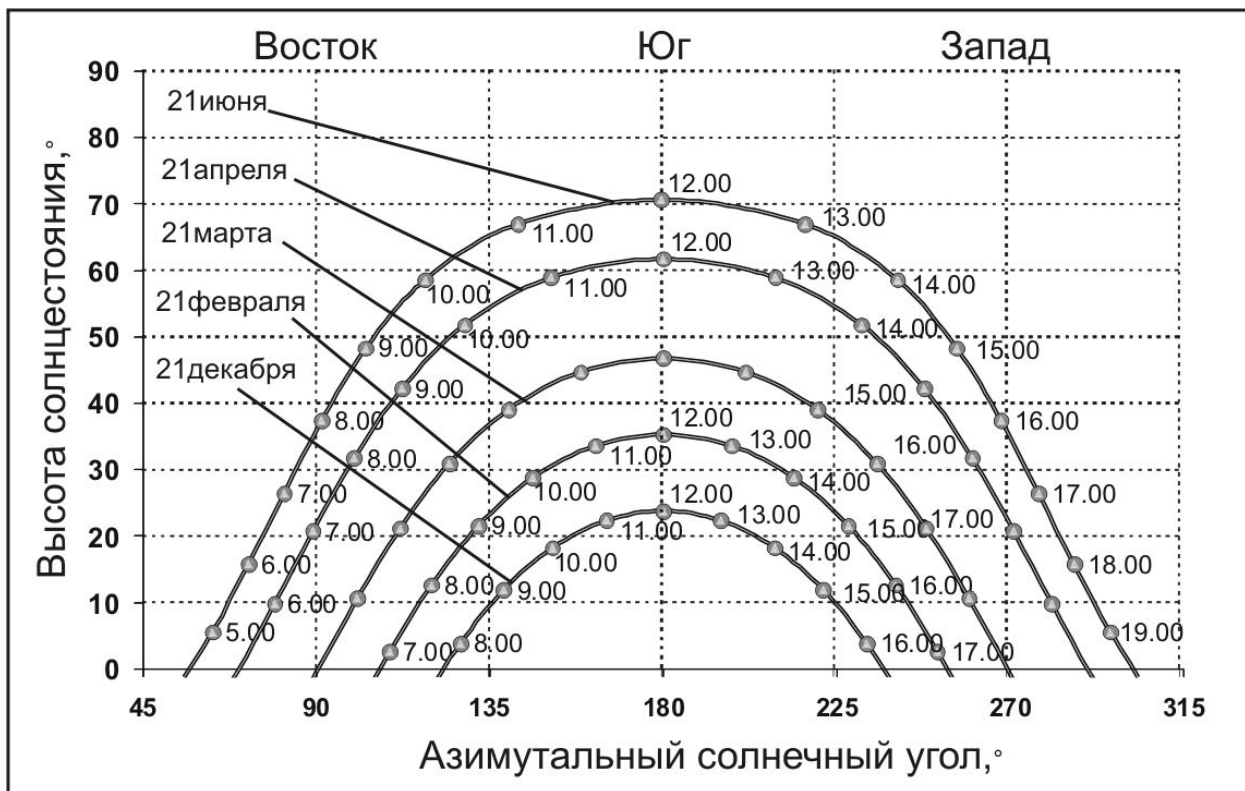


Рис.2.5 Диаграмма траектории солнца для г.Бишкек (КР)

На рис.2.5 изображена диаграмма траектории солнца для города Бишкек (42,8°с.ш., 74,5°в.д). Траектории солнца для других месяцев можно интерполировать по представленным кривым. (На траекториях солнце проставлено также солнечное время). Из диаграммы видно, что восход солнца 21 июня наступает до 5 часов солнечного времени, а максимальный угол высоты солнцестояния составляет около 70°. По данным диаграммы можно оценить степень затенения, вызванного различными предметами на любую поверхность.

### 2.3 Приходящая солнечная радиация на наклонную поверхность

Суммарная солнечная радиация ( $G_{gl}$ ), падающая на наклонную поверхность, складывается из трех составляющих: *прямая солнечная радиация* ( $G_{dir}$ ), *диффузная (рассеянная) солнечная радиация* ( $G_{diff}$ ) и *отраженная солнечная радиация* ( $G_{ref}$ ):

$$G_{gl} = G_{dir} + G_{diff} + G_{ref} \cdot \quad (2.5)$$

*Прямая солнечная радиация* ( $G_{dir}$ ) - это солнечное излучение, поступающее от Солнца без изменения направления.

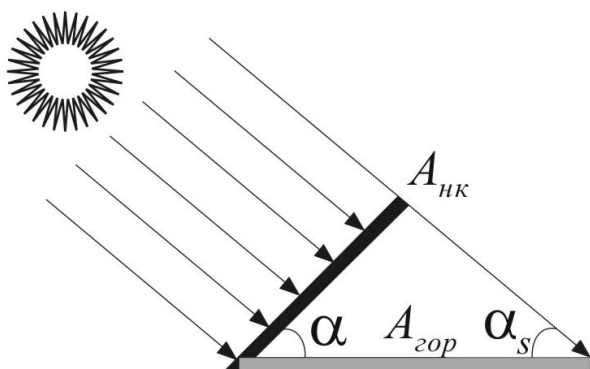


Рис. 2.6 Солнечное излучение на горизонтальную и наклонную поверхность

На рис.2.6 показано, что на горизонтальную поверхность площадью  $A_{гор}$  и на наклонную поверхность меньшей площади  $A_{нк}$ , расположенной перпендикулярно к направлению излучения, падает равное количество солнечного излучения. На актинометрических станциях ведутся замеры приходящей радиации на горизонтальную поверхность.

С помощью тригонометрических выражений можно выразить прямую солнечную радиацию для любой наклонной плоскости.

Первое выражение для расчета прямой солнечной радиации на наклонную поверхность дано через угол наклона и угол высоты солнцестояния:

$$G_{dir,нк} = G_{dir,гор} \cdot \frac{\cos \Theta}{\sin \alpha}, \quad (2.6)$$

где  $\Theta$  - угол падения солнечной радиации на поверхность, град;  $\alpha$  -высота солнцестояния, град.

Второе выражение для расчета прямой радиации на наклонную поверхность содержит угол падения солнечной радиации и угол зенита:

$$G_{dir,нк} = G_{dir,гор} \cdot \frac{\cos \Theta}{\cos \Theta_z}. \quad (2.7)$$

*Диффузная, или рассеянная, солнечная радиация ( $G_{diff}$ )* – это солнечное излучение после изменения его первоначального направления вследствие отражения и рассеивания атмосферой.

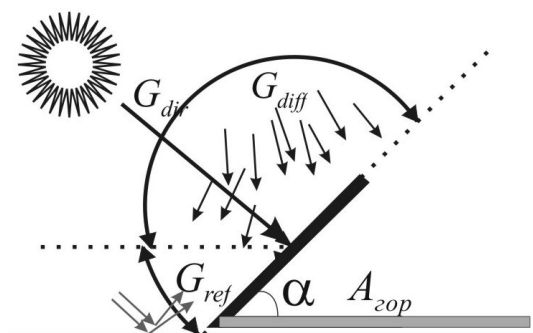


Рис.2.7 Прямая, диффузная и отраженная солнечная радиация на наклонную поверхность

Оценить приходящую солнечную диффузную радиацию теоретически очень сложно. Существуют различные модели по оценке приходящей солнечной диффузной радиации. Среди моделей по расчету приходящей солнечной диффузной радиации выделяют: *изотропную модель, модель Хейвуда-Девидса и Перец модель.*

Изотропная модель предполагает, что рассеянная радиация равномерно распределена по небосводу. Приход диффузной радиации на наклонную



поверхность будет меньше, чем на горизонтальную поверхность той же площади [VAJ08].

$$G_{diff,нк} = G_{diff,гор} \cdot \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}. \quad (2.8)$$

Выражение 2.8 применимо, если небо полностью затянуто облаками или если не требуются относительно точные данные. Для более точного расчета солнечной радиации применяют неизотропную Перец модель. Эта модель для определения поправочного коэффициента вводит поправки: индекс чистого неба и индекс ясности неба. В результате получается эмпирическая формула, которая более точно определяет уровень диффузной радиации на наклонную поверхность.

*Отраженная солнечная радиация* ( $G_{ref}$ ) – это солнечная радиация, отраженная от земной поверхности.

Для расчета отраженной солнечной радиации на наклонную поверхность используют коэффициент отражения поверхностей, который по другому называется *коэффициентом альбедо* ( $A$ ) [Qua07].

$$G_{ref,нк} = G_{gl,гор} \cdot A \cdot \frac{(1 - \cos \alpha)}{2}. \quad (2.9)$$

Табл. 2.2

Коэффициент альбедо для различных поверхностей

Поверхность	Альбедо (A)	Поверхность	Альбедо (A)
Чистый снег	0,8...0,9	Гравий	0,18
Цемент	0,55	Асфальт	0,15
Сухая трава	0,28...0,32	Пустыни и полупустыни	0,1...0,25
Трава (июль, авг.)	0,25	Вода ( $\alpha_s > 45^\circ$ )	0,05
Бетон	0,2...0,3	Вода ( $\alpha_s > 30^\circ$ )	0,08
Земля	0,17	Вода ( $\alpha_s > 20^\circ$ )	0,12

## 2.4 Средства и приборы измерения солнечной радиации и продолжительности солнечного сияния

Для проектирования солнечной установки необходимо учитывать метеорологические данные местности, где предполагается эксплуатация будущей установки. Метеорологические данные, такие как солнечная радиация, температура окружающей среды можно непосредственно получить из справочников метеостанций или провести измерения самостоятельно.

Для измерения прямой солнечной радиации применяются *актинометры* различных конструкций. Актинометры, которые позволяют измерять интенсивность радиации в абсолютных единицах, называются *пиргелиометрами*.

Одними из первых стандартных приборов для измерения прямой солнечной радиации был *пиргелиометр Ангрема* и *проточный калориметр Аббота*.

*Пиргелиометр* – это измерительный прибор, использующий визированный датчик для измерения потока солнечной радиации (прямой радиации), исходящей от небольшого участка небосвода, включающего Солнце.

Термоэлектрический актинометр Савинова–Янишевского (рис.2.8) [ОАД07] служит для измерения интенсивности прямой солнечной радиации. Приемная часть актинометра – термозвездочка 11, состоит из тонкого диска, сделанного из серебряной фольги, и вмонтированного в чашку 1, установленную на трубке 2 актинометра. Одна сторона диска, обращенная к Солнцу, зачернена, к другой стороне приклеены внутренние (нечетные) спаи термоэлектрической батареи, которая имеет вид звездочки. Внешние (четные) спаи приклеены к медному кольцу, положенному на термозвездочку и зажатому в корпусе прибора. При наклейке спаев термозвездочка изолируется папиросной бумагой от диска и корпуса. Внутри трубки имеются пять диафрагм, которые защищают приемную часть от влияния ветра и проникновения рассеянной и отраженной радиации. Между наблюдениями трубка закрыта крышкой, которая предохраняет диск от загрязнения.

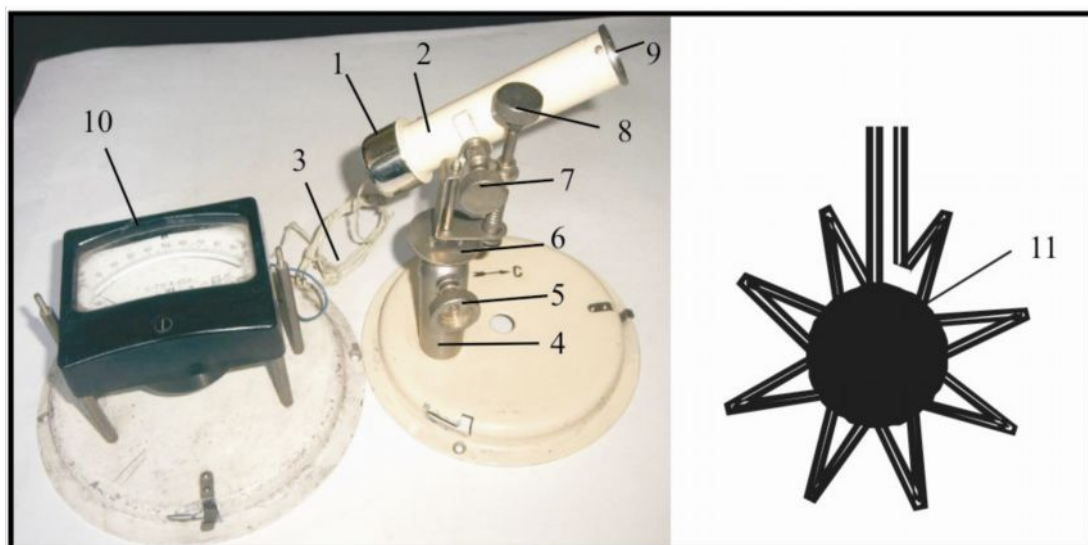


Рис.2.8 Термоэлектрический актинометр Савинова-Янишевского

Термоэлектрический актинометр укрепляется на небольшом штативе 4, позволяющем производить установку по широте местности, а также допускающем вращение трубки прибора по высоте и азимуту. На широту местности актинометр устанавливается следующим образом: отвинчивают винт 5 и соответствующее деление сектора 6 подводят к индексу, после чего снова закрепляют. Ось, вокруг которой осуществляется горизонтальный

поворот трубки, должна располагаться в плоскости меридиана и иметь наклон на север в соответствии с широтой.

С помощью винтов 7 и 8 трубка грубо наводится на солнце. Для точной наводки в наружной диафрагме сделано небольшое круглое отверстие. Против этого отверстия в нижней части прибора имеется белый экран. При правильной установке прибора солнечный луч, проникший через это отверстие, должен дать светлое пятно (зайчик) в центре экрана. Для измерения термотока, возникающего в приемнике актинометра, подключают *стрелочный гальванометр 10*.

Интенсивность солнечной радиации (на метеостанции «Фрунзе») в ккал/см<sup>2</sup> определяется по формуле:

$$G_{dir,нк} = a \cdot N_2, \quad (2.10)$$

где  $N_2$  - отсчет гальванометра (отклонение стрелки от нулевого положения),  $a$  – переводный множитель прибора, ккал/см<sup>2</sup>.

Определив мощность притока прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность, ее пересчитывают на горизонтальную поверхность и записывают в журнал:

$$G_{dir,гор} = G_{dir,нк} \cdot \frac{\sin \alpha_s}{\cos \Theta} = G_{dir,нк} \cdot \frac{\sin \alpha_s}{\cos 0} = G_{dir,нк} \cdot \sin \alpha_s, \quad (2.11)$$

где  $\alpha_s$  – угол высоты солнцестояния в момент наблюдения.

*Пиранометр* – это измерительный прибор для оценки интегральной полусферической солнечной (прямой и рассеянной) радиации. Если необходимо измерить лишь диффузную солнечную радиацию, то используют пиранометр с затемняющим кольцом.

Пиранометр универсальный типа М-80 (рис.2.9) [ОАД07] предназначен для измерения суммарной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность. Приемная часть пиранометра представляет собой термоэлектрическую батарею 1, состоящую из манганиновых и константановых полосок. Все четные спаи термобатареи побелены магнием, а нечетные – зачернены сажей. Для защиты от действия длинноволновой радиации и от ветра приемная поверхность, укрепленная на металлической подставке 2, покрыта стеклянным колпаком 3. Для измерения только рассеянной радиации пользуются теневым экраном (или затемняющим кольцом) 4, которым защищают приемную часть прибора от воздействия прямой солнечной радиации.

Под действием солнечной радиации зачерненные спаи термобатареи нагреваются сильнее, чем белые. Разность температур вызывает в цепи термоэлектрический ток, сила которого пропорциональна величине радиации, падающей на приемник и который измеряется гальванометром. Величина падающей на прибор радиации пропорциональна числу делений  $n$ , на которое отклоняется стрелка гальванометра.

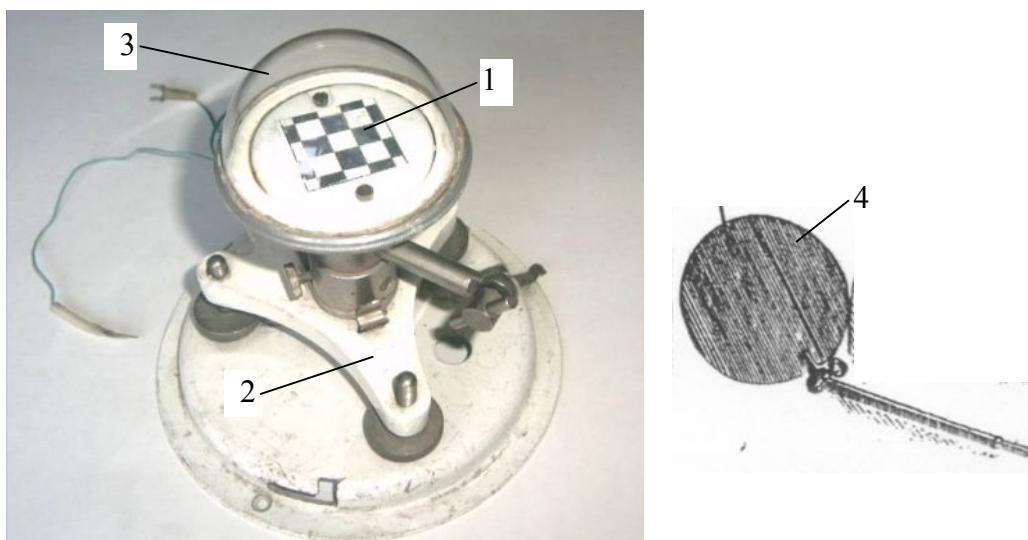


Рис.2.9 Термоэлектрический пиранометр

Для определения суммарной радиации на метеорологических станциях обычно наблюдают одновременно по двум приборам – прямую радиацию (I) по актинометру и рассеянную (D) по пиранометру, затем их суммируют:

$$G_{gl} = G_{dir, \text{нк}} \cdot \sin \alpha_s + G_{diff} . \quad (2.12)$$

Если измерения суммарной радиации производятся только по пиранометру (при отсутствии актинометра), то необходимо делать отсчеты при открытом пиранометре ( $N_{zo}$ ) и при затененном ( $N_{z3}$ ). Рассеянную радиацию в этом случае вычисляют по формуле:

$$G_{diff} = a \cdot N_{z3} . \quad (2.13)$$

Вычисления прямой солнечной радиации производят следующим образом. Показание, соответствующее только прямой радиации, равно разности отсчетов ( $N_{zo} - N_{z3}$ ), умножают на переводной множитель  $a$  и на поправочный множитель  $F$ , зависящий от высоты Солнца. Поправочный множитель  $F$  находят по графику, приложенному к паспорту пиранометра. Таким образом, прямая солнечная радиация определяется по формуле:

$$G_{dir, \text{зоп}} = a \cdot (N_{zo} - N_{z3}) \cdot F . \quad (2.14)$$

При слабом солнечном сиянии (O) и в облачную погоду суммарная радиация равна рассеянной:

$$G_{gl} = G_{diff} . \quad (2.15)$$

Другой вид пиранометра является более усовершенствованным и имеет низкую погрешность. Данный пиранометр производится известной фирмой KIPP  $\alpha$  Zonen под названием CM 11 [KIZ00]. Чувствительный элемент пиранометра представляет собой керамический диск, окрашенный в черный

цвет. Используя тонкопленочную технологию, 100 термоэлементов впаяны в диск. В середине диска, симметрично его центру расположены 100 горячих спай. 100 холодных спай находятся по краям диска, имеющего хороший тепловой контакт с телом пиранометра (теплоотвод).

При попадании солнечного излучения на прибор, оно (излучение) поглощается керамическим диском и возникает тепловой поток, направленный к телу пиранометра. Температура в центре диска повышается благодаря термическому сопротивлению. Термическое сопротивление субстрата  $Al_2O_3$  относительно низкое, так, например, при мощности солнечного излучения  $1000 \text{ Вт/м}^2$  температура в центре повышается на  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Данная разница температур диска конвертируется в электрический сигнал порядка 4-6 мВ. Внешний и внутренний стеклянные колпаки защищают пиранометр от осадков и ветра, а также равномерно пропускают солнечную радиацию к диску. Эксикатор, расположенный в теле пиранометра, поглощает влагу, которая может сконденсироваться на внутреннем стеклянном колпаке, ночью при ясном небе.

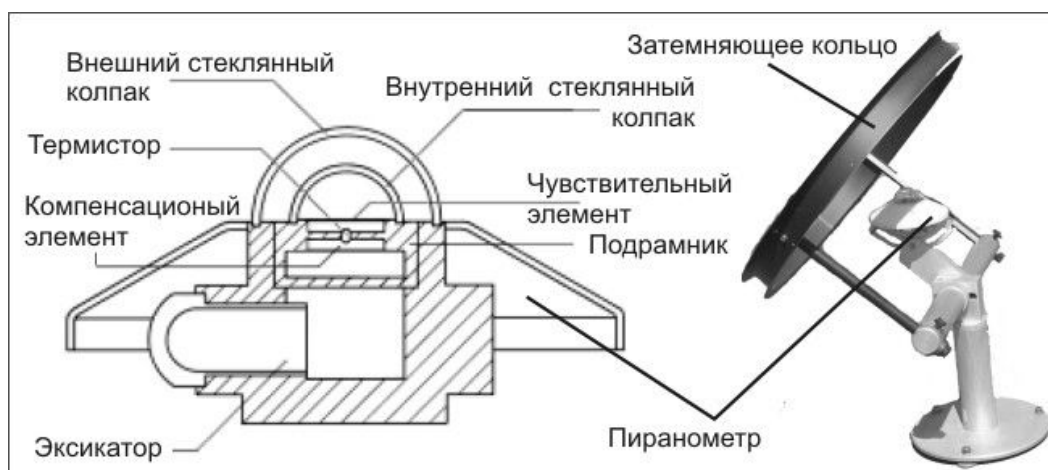


Рис.2.10 Пиранометр и с затемняющим кольцом



Рис.2.11 Прибор Кэмпбэлла-Стокса

*Гелиограф* служит для измерения продолжительности солнечного сияния – другого показателя, который наблюдается на метеорологических станциях. Одним из старых приборов, однако, до сих пор находящимся в применении, является самопищущий гелиограф Кэмпбэлла-Стокса, который состоит из сферической линзы и специальной бумаги, на которой регистрируются измерения. Сферическая линза фокусирует солнечное излучение на обработанную бумагу, что приводит к ее прожиганию.

При облачном небе мощность излучения недостаточна и бумага не прожигается. Длина прожженных участков соответствует продолжительности солнечного сияния.

Более совершенный прибор для измерения продолжительности солнечного сияния состоит из двух фотоэлементов, один из которых экранирован от прямой солнечной радиации. Таким образом, если преобладает рассеянная радиация, то оба прибора регистрируют относительно одинаковые показания. В случае преобладания прямой радиации незэкранированный прибор фиксирует более высокую интенсивность солнечного излучения. Продолжительность сохранения разницы обоих приборов в интенсивностях излучения соответствует продолжительности солнечного сияния. Единица измерения продолжительности солнечного сияния - 1 час.

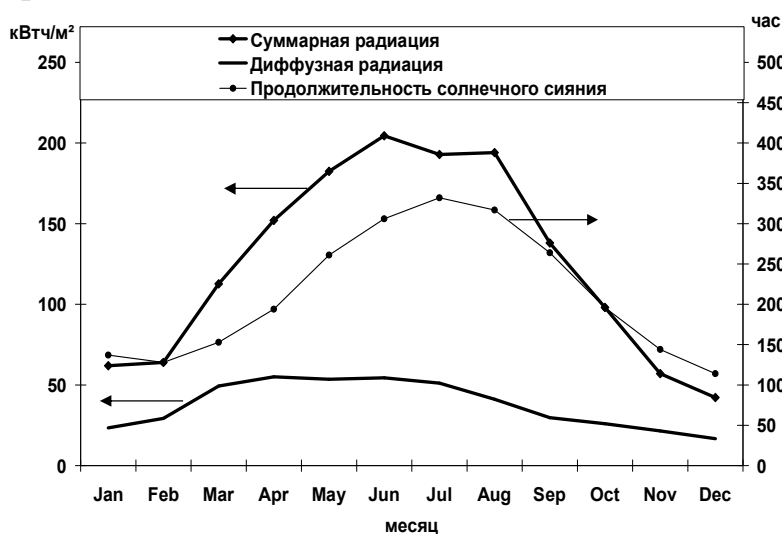


Рис.2.12 Метеорологические данные города Бишкек КР, широта 42,5°

В заключение приведены графики (рис.2.12) [Бот07] суммарной и диффузной солнечной радиации, а так же продолжительности солнечного сияния для города Бишкек. Анализируя данные можно отметить следующее: суммарная и диффузная приходящая солнечная радиация на горизонтальную поверхность за один год

составляют 1500 кВт·ч/м² и 451 кВт·ч/м² соответственно. Продолжительность солнечного сияния составляет 2546 часов в год.

## 2.5 Вопросы для самопроверки и примеры задач

1. Что такое планета Солнце?
2. Как образуется солнечная энергия?
3. Что такое солнечная постоянная и чему она равна?
4. Что показывают азимутальный угол, угол склонения, угол наклона?
5. Опишите процессы, происходящие с солнечным излучением в атмосфере.
6. Что такое прямая, диффузная и суммарная радиации?
7. Что такое коэффициент альбедо?
8. Какие модели диффузной радиации Вам известны?

**Задача №1.** Определить угол падения прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Бишкеке (широта -  $42.8^\circ$  с.ш., долгота-  $74.5^\circ$  в.д.), в 12.00 ч. по солнечному времени, 21 июня и 21 декабря.

*Решение:*

1. Согласно формуле (2.3), угол падения можно вычислить:

$$\cos \Theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega + \\ + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega.$$

2. Определяем неизвестные углы:

$\delta_1 = 23,45^\circ$ ,  $\delta_2 = -23,45^\circ$  - величина солнечного склонения для 21 июня и 21 декабря соответственно.

$\varphi = 42,8$  - географическая широта города Бишкек;

$\alpha = 0$  - угол наклона, учитывая, что поверхность горизонтальная;

$\omega = 0$  - часовой угол в солнечный полдень;

$\gamma = 0$  - азимутальный угол поверхности.

3. Учитывая что  $\sin 0 = 0$ , формула примет следующий вид:

$$\cos \Theta_1 = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega = \\ = \sin 23,45 \cdot \sin 42,8 \cdot \cos 0 + \cos 23,45 \cdot \cos 42,8 \cdot \cos 0 \cdot \cos 0 = 0,943$$

$$\cos \Theta_2 = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega = \\ = \sin(-23,45) \cdot \sin 42,8 \cdot \cos 0 + \cos(-23,45) \cdot \cos 42,8 \cdot \cos 0 \cdot \cos 0 = 0,403$$

4. Угол падения для указанных дат 21 июня и 21 декабря, град.:

$$\Theta_1 = \arccos(0,943) = 19,35;$$

$$\Theta_2 = \arccos(0,403) = 66,25.$$

**Задача №2.** Метеорологическая служба г.Бишкек зафиксировала приходящую солнечную радиацию на горизонтальную поверхность ( $G_{dir,гор}$ ) для 21 июня –  $600 \text{ Вт/м}^2$  и 21 декабря  $250 \text{ Вт/м}^2$ . Определите мощность излучения прямой радиации на наклонную поверхность, угол наклона равен  $30^\circ$ , для 21 июня и 21 декабря.

*Решение:*

1. Мощность солнечного излучения на наклонную поверхность определяется по (2.5):

$$G_{dir,нк} = G_{dir,гор} \cdot \frac{\cos \Theta}{\sin \alpha_s},$$

где  $G_{dir,гор}$  - мощность приходящей солнечной радиации на горизонтальную поверхность,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $\Theta$  - угол падения солнечной радиации на поверхность, град;  $\alpha_s$  - высота солнцестояния, град.

2. На рис.2.13 изображены углы, необходимые для расчета:

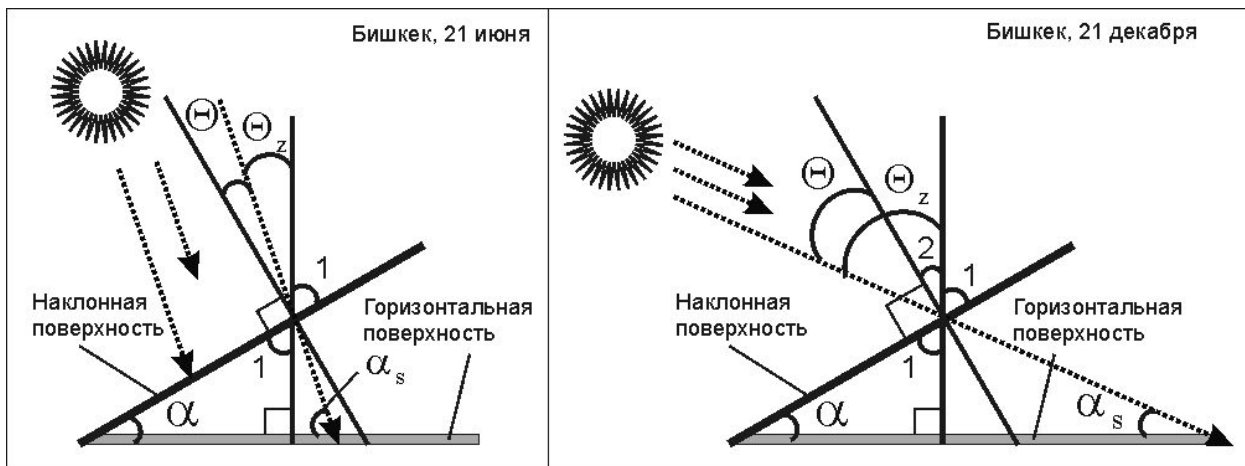


Рис.2.13 Взаимосвязь углов, необходимых для расчета для г.Бишкек

3. Используя результаты, полученные в задаче №1, и учитывая, что для горизонтальной поверхности угол падения равен зенитному углу, определим угол падения:

А) угол падения для Бишкека 21 июня, используя взаимосвязанные углы:

$$\Theta = 90 - (\angle 1 + \Theta_z) = 90 - (90 - \alpha + \Theta_z) = \alpha - \Theta_z;$$

Б) угол падения для Бишкека 21 декабря, используя взаимосвязанные углы:

$$\Theta = \Theta_z - \angle 2 = \Theta_z - (90 - (90 - \alpha)) = \Theta_z - \alpha.$$

4. Сравнивая формулы, полученные из пункта 3 можно сделать вывод:

$$\Theta = |\alpha - \Theta_z|$$

5. Вычисляем мощность солнечного излучения на наклонную поверхность для 21 июня и 21 декабря соответственно, Вт/м<sup>2</sup>:

$$G_{dir,нк1} = G_{dir,гор1} \cdot \frac{\cos \Theta}{\cos \Theta_z} = 600 \cdot \frac{\cos(|30 - 19,35|)}{\cos(19,35)} = 600 \cdot \frac{0,98}{0,94} = 625;$$

$$G_{dir,нк1} = G_{dir,гор1} \cdot \frac{\cos \Theta}{\cos \Theta_z} = 250 \cdot \frac{\cos(|30 - 66,25|)}{\cos(66,25)} = 250 \cdot \frac{0,81}{0,04} = 500,59.$$

**Задача №3.** Докажите, что формулы (2.6) и (2.7) для определения прямой солнечной радиации на наклонную поверхность идентичны

*Решение:*

1. Используя рис.2.13 предыдущей задачи №3, имеем:

$$\alpha_s + \Theta_z = 90^\circ.$$

2. Из тригонометрии известно, что  $\cos \alpha = \sin(90 - \alpha)$ .

3. Объединяя два последних выражения получаем:

$$G_{dir,нк} = G_{dir,гор} \cdot \frac{\cos \Theta}{\cos \Theta_z} = G_{dir,гор} \cdot \frac{\cos \Theta}{\sin(90 - \Theta_z)} = G_{dir,гор} \cdot \frac{\cos \Theta}{\sin \alpha_s}.$$



*Задача №4.* Рассчитать оптимальный угол наклона для приемника солнечной энергии для лета с 1.06 по 31.08, зимы с 1.12 по 28.02 и периода времени с 1.09 по 30.11.

*Решение:*

1. Определяем по формуле (2.2) Купера угол склонения для трех промежутков времени:

$$\text{для 1.06} \quad \delta_1 = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \left(\frac{284 + 152}{365}\right)\right) = 22;$$

$$\text{для 31.08} \quad \delta_2 = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \left(\frac{284 + 243}{365}\right)\right) = 8,1;$$

$$\text{для 1.12} \quad \delta_3 = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \left(\frac{284 + 335}{365}\right)\right) = -22,1;$$

$$\text{для 28.02} \quad \delta_4 = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \left(\frac{284 + 59}{365}\right)\right) = -8,67;$$

$$\text{для 1.09} \quad \delta_5 = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \left(\frac{284 + 244}{365}\right)\right) = 7,72;$$

$$\text{для 30.11} \quad \delta_6 = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \left(\frac{284 + 334}{365}\right)\right) = -21,97.$$

2. Определим среднее значение склонения для каждого из промежутков:

$$\delta_{cp} = (\delta_1 + \delta_2) / 2$$

$$\delta_{cp1} = (\delta_1 + \delta_2) / 2 = (22 + 8,1) / 2 = 15;$$

$$\delta_{cp2} = (\delta_3 + \delta_4) / 2 = (-22,1 + (-8,67)) / 2 = -15,4;$$

$$\delta_{cp3} = (\delta_4 + \delta_5) / 2 = (7,72 + (-21,97)) / 2 = -7,12.$$

3. Определим оптимальный угол наклона приемника:

$$\alpha = \varphi \pm \delta_{cp}$$

$$\text{с 1.06 по 31.08} \quad \alpha_1 = \varphi \pm \delta_{cp} = 42,7 - 15 = 27,7;$$

$$\text{с 1.12 по 28.02} \quad \alpha_2 = \varphi \pm \delta_{cp2} = 42,7 + 15,4 = 58,1;$$

$$\text{с 1.09 по 30.11} \quad \alpha_3 = \varphi \pm \delta_{cp3} = 42,7 + 7,12 = 49,82.$$

## ГЛАВА 3. СОЛНЕЧНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ СИСТЕМЫ

### 3.1 Солнечные тепловые системы и их компоненты

*Солнечные тепловые системы – это системы, преобразующие солнечное излучение на первом этапе в тепловую энергию.* Среди тепловых солнечных систем различают активные и пассивные системы. К активным тепловым солнечным системам относятся различные солнечные установки, например, преобразователь солнечной энергии (коллектор) с баком-аккумулятором. Пассивные системы представляют собой элементы конструкций зданий, например, окна на южном фасаде или затененные окна с помощью кровли крыши в летнее время.

Наиболее очевидная область использования солнечной энергии – это подогрев воды и воздуха. Соответственно, существует множество технических решений, позволяющих использовать солнечную энергию для горячего водоснабжения, отопления, опреснения воды, сушки сельскохозяйственной продукции и даже охлаждения. Для бытовых нужд самыми распространенными являются установки для горячего водоснабжения и солнечного отопления.

Любая солнечная установка состоит из ряда компонентов, одни из которых преобразуют энергию, другие транспортируют ее, а третьи сохраняют. На рис.3.1 приведена принципиальная схема солнечной установки горячего водоснабжения. Солнечный коллектор (1) - часть солнечной установки, позволяющая преобразовывать солнечную энергию в тепловую. Тепловая энергия переносится теплоносителем (вода, антифриз) по трубопроводам (8) через теплообменник (3) в бак-аккумулятор, в котором происходит накопление тепловой энергии. Топка (5) предназначена для догрева воды, которая потом через выход (7) подается потребителю. Через подводящий трубопровод (6) происходит пополнение воды в баке-аккумуляторе. Циркуляционный насос (4) необходим для создания циркуляции теплоносителя.

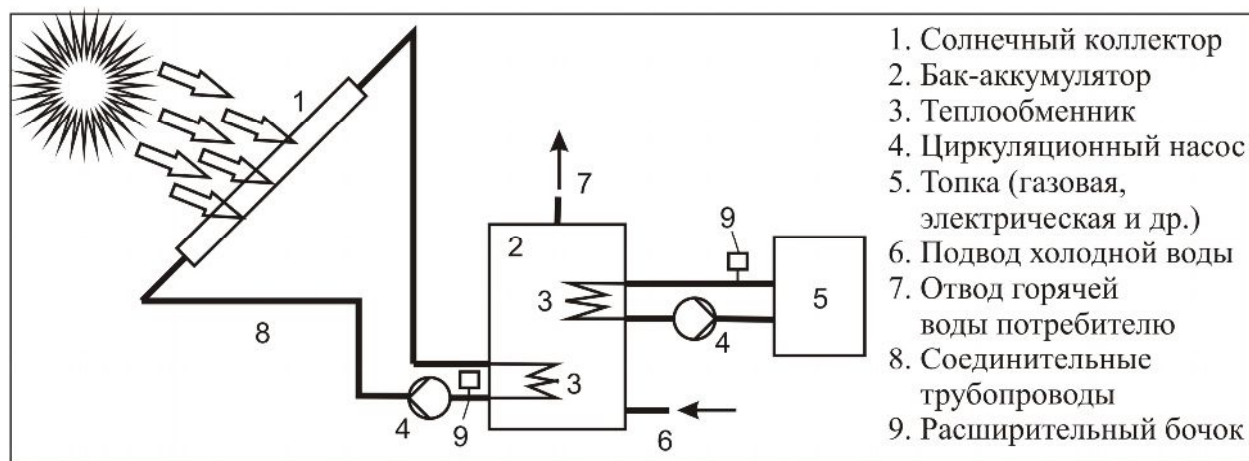


Рис.3.1 Схема солнечной установки для горячего водоснабжения

### 3.1.1 Виды солнечных коллекторов

Солнечный коллектор является одним из основных компонентов солнечной нагревательной установки. В этом компоненте происходит поглощение солнечной радиации, превращения ее в тепловую энергию, и передача тепловой энергии теплоносителю.

Существуют различные типы классификации солнечных коллекторов. Коллектора в зависимости от достигаемой выходной температуры делятся на *низкотемпературные*, *среднетемпературные* и *высокотемпературные*. Кроме того, различают *концентрирующие* и *не концентрирующие* коллектора. В данной книге группировка коллекторов осуществляется в зависимости от используемого теплоносителя (жидкость или воздух): *воздушные* и *жидкостные*. В воздушных коллекторах в качестве теплоносителя используется воздух, а в жидкостных - это вода, незамерзающие смеси (например, гликоль), а также специальные растворы солей, которые нагревают выше 500 °С.

*Жидкостные коллекторы.*

Среди жидкостных коллекторов можно выделить основные четыре типа:

*плоский;*

*неостекленный (абсорбер);*

*вакуумированный;*

*концентрирующий.*

На рис. 3.2 изображен - *плоский солнечный коллектор. Работа плоского коллектора - преобразование солнечного излучения в тепловую энергию - основана на парниковом эффекте. Светопрозрачное покрытие является прозрачным для солнечного излучения, однако, непрозрачным для инфракрасного. Солнечное излучение проходит через светопрозрачное покрытие и поглощается абсорбером, за счет чего он нагревается. Нагретый абсорбер становится источником длинноволнового (инфракрасного) излучения. Однако, благодаря свойству светопрозрачного покрытия, большая часть энергии остается внутри коллектора и поглощается теплоносителем.*

*Абсорбер* является основным элементом солнечного коллектора. Абсорбер изготавливается в основном из меди и алюминия, которые имеют хорошие коэффициенты теплопроводности и являются коррозиестойкими. Имеются также абсорберы, сделанные из нержавеющей стали или пластмассы, например, из полипропилена. На рынке цветных металлов медь стоит дороже, чем алюминий, поэтому иногда листы абсорберов изготавливают из алюминия, а трубки из меди. Такая комбинация стала возможна с развитием ультразвуковой сварки, позволяющей варить медь с алюминием.

Плоский солнечный коллектор состоит из основных следующих компонентов:

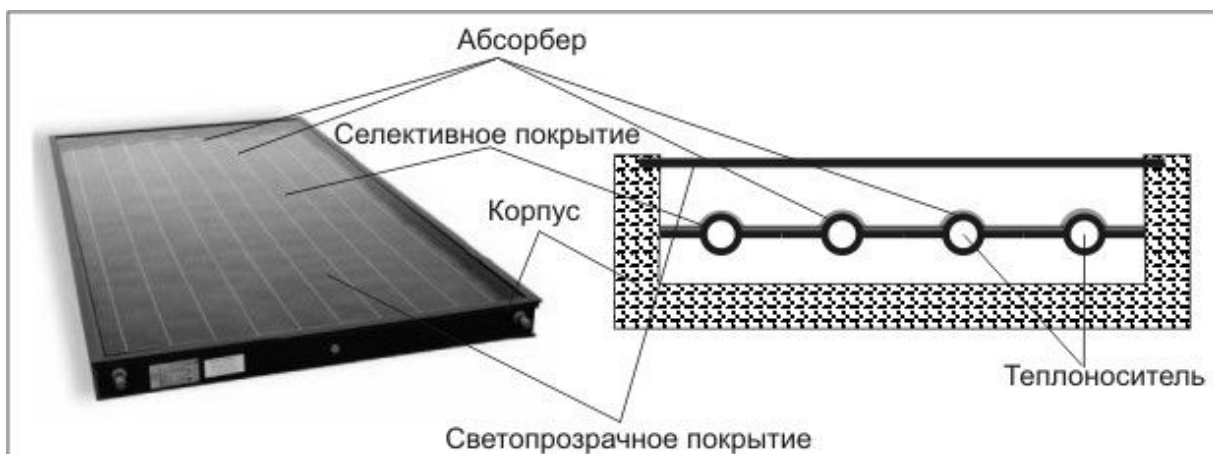


Рис.3.2 Плоский коллектор (справа) и его поперечный срез (слева)

*Селективное покрытие* представляет собой тонкое покрытие (150-200 нм), которое наносится поверх абсорбера и повышает эффективность солнечного коллектора. Селективное покрытие хорошо поглощает коротковолновую радиацию (т.е. солнечное излучение), одновременно имеет низкую излучательную способность в инфракрасном спектре. Основным критерий оценки селективного покрытия - это отношение поглощающей и излучательной способностей:

$$\xi = \frac{\alpha}{\varepsilon}, \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  - коэффициент поглощения или абсорбции, по определению, та часть приходящей солнечной радиации, которая была поглощена;

$\varepsilon$  - коэффициент излучения, показывающий, какая часть длинноволнового спектра излучается.

Чем больше коэффициент  $\xi$ , тем лучше селективное покрытие. На сегодняшний день известно много коммерческих продуктов, имеющих  $\alpha = 0,95$ ,  $\varepsilon = 0,05$ , соответственно,  $\xi = 19$ .

*Светопрозрачное покрытие* является прозрачной теплоизоляцией для солнечного коллектора. В качестве светопрозрачного покрытия используют специальное стекло с низким содержанием железа (в остеклении зданий – концентрация железа намного больше) или прозрачный пластик. Светопрозрачное покрытие должно хорошо пропускать солнечную радиацию. Мерой качества светопрозрачного покрытия для солнечного коллектора является коэффициент трансмиссии. Коэффициент трансмиссии ( $\tau$ ) – это доля солнечного излучения, которая прошла сквозь стекло, например, для специального стекла он достигает 0,97, т.е. на потери при отражении и поглощении приходится 3%.

*Корпус с изоляцией* служит для связи основных компонентов солнечного коллектора. Корпус изготавливают из алюминия, оцинкованного железа, синтетических материалов или дерева. Корпус придает коллектору механическую прочность.

Изоляция для теплового коллектора сделана из стандартных изоляционных материалов (например, полиуретан, стекловолокно, минеральная вата), имеющих маленький коэффициент теплопроводности. Одним из требований к изоляции также является температуростойкость.

*Теплоноситель.* В качестве теплоносителя для солнечного теплового коллектора может служить вода, смесь воды с антифризом или специальный раствор соли. Теплоноситель должен удовлетворять следующим требованиям: иметь относительно высокий коэффициент теплоемкости, низкий коэффициент вязкости, быть нетоксичным, не быть коррозионным для трубопроводов системы.

Для круглогодичных солнечных систем горячего водоснабжения и отопления в качестве теплоносителя применяется смесь воды с антифризом, для избежания размораживания системы. В качестве антифриза зачастую используется этиленгликоль или пропиленгликоль. Такая смесь в зависимости от концентрации имеет низкую температуру замерзания, что позволяет безопасно использовать установку круглый год. Однако, такой теплоноситель по сравнению с водой имеет следующие недостатки – пониженный коэффициент теплоемкости, повышенный коэффициент вязкости (табл.3.1). Пониженный коэффициент теплоемкости означает повышение температуры теплоносителя при транспортировке тепловой энергией, что соответственно увеличивает тепловые потери. Повышенный коэффициент вязкости ведет к увеличению мощности насоса для создания принудительной циркуляции теплоносителя.

Табл.3.1

Характеристики теплоносителей

	Температура замерзания (°С)	Теплопроводность при 50 °С Вт (м·°С)	Теплоемкость при 50 °С (Дж(кг°С))	Кинематическая вязкость при 20 °С (мм <sup>2</sup> /с)
Вода	0	0,64	4180	1,004
Вода- гликоль (60%/ 40 %)	-27	0,44	3850	4,3

*Неостекленный коллектор (абсорбер).* Самым простым тепловым солнечным коллектором является абсорбер или неостекленный коллектор, состоящий лишь из абсорбера. Абсорбер не имеет изоляции и светопрозрачного покрытия, изготовлен из пластмасс, таких как этилен-пропилен-диен-мономер (EPDM) или полипропилен (PPH) [Roc01]. EPDM материал, который кроме солнечной энергетики применяется для пластиковых окон или в качестве заполнителя швов в зданиях и в автопромышленности. Материал является долговечным (около 30 лет) даже при постоянном воздействии ультрафиолетового излучения. Является морозостойким и применяется при широком спектре температур (от -50 °С до 150 °С). Подобные солнечные абсорберы, предназначенные для нагрева

воды, характеризуются простотой, дешевизной, долговечностью, а также отсутствием коррозии. Главным отличием абсорберов от других видов коллекторов является их повышенный конвективный теплообмен с окружающей средой, в связи с чем ограничивается температура нагрева воды. Одновременно абсорберы обладают высоким оптическим КПД (продукт  $\tau\alpha^1$ ) в виду отсутствия светопрозрачного покрытия, поэтому при незначительных нагревах теплоносителя (ненамного превышающего температуру окружающей среды) данный коллектор наиболее эффективен, чем все остальные виды коллекторов.

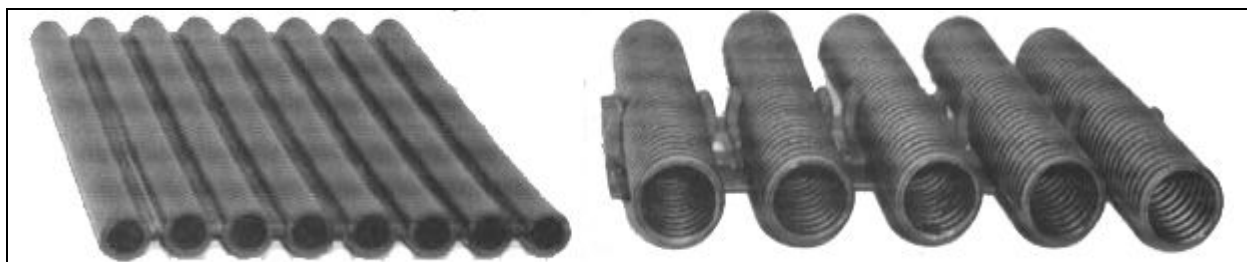


Рис.3.3 EPDM абсорбер трубчатый (слева) и PPH абсорбер-гофрированные трубы (справа)

Соединительные трубопроводы для абсорберов выполнены прежде всего из полиэтилена (PE), полипропилена (PP) и поливинилхлорида (PVC). Трубопроводы из поливинилхлорида должны быть защищены от ультрафиолетового излучения, а также быть опорожнены в зимний период. Заметим, что подобные абсорберы нашли широкое применение для подогрева воды в плавательных бассейнах, и пользуются большим спросом в Европе и США.

*Вакуумированный коллектор.* Вакуумированный коллектор получил своеобразное название ввиду вакуума, который является теплоизоляцией для данного коллектора. Если необходимо достичь более высокой температуры, то применяются вакуумные коллекторы. Основным компонентом вакуумного коллектора является стеклянная трубка, находящаяся внутри другой стеклянной трубки. Селективное покрытие нанесено на внешнюю поверхность поглощающей внутренней трубы. Пространство между трубками заполнено вакуумом, давление может достигать 0,1 Па и поддерживаться более 100 лет. Обычно внешний диаметр трубки достигает 2-5 см, а внутренний 1-2 см. Вакуумированные коллекторы являются модульными, т.е. трубки можно добавлять или снимать по мере надобности, в зависимости от потребности в горячей воде.

<sup>1</sup> Где  $\tau$ -коэффициент трансмиссии светопрозрачного покрытия,  $\alpha$  –коэффициент поглощения абсорбера

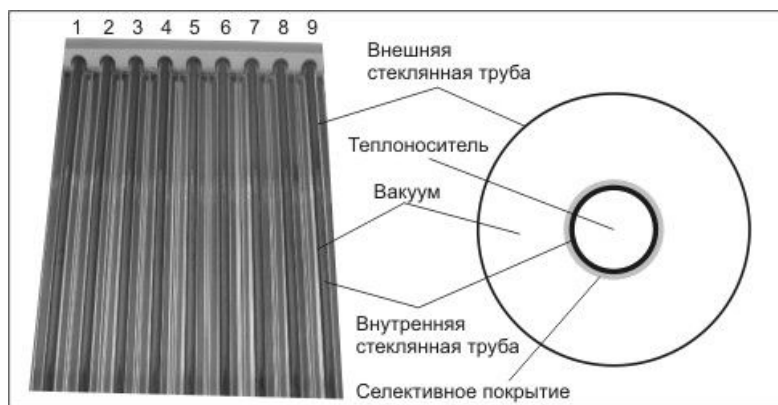


Рис.3.4 Вакуумированный коллектор

На рис.3.4 изображен вакуумированный коллектор (слева), состоящий из девяти вакуумных трубок, и поперечное сечение девятой вакуумной трубки.

Отличительная особенность, характеризующая все трубчатые коллектора, заключается в том, что потери на отражение солнечной радиации будут меньше, чем в коллекторах с плоской остекленной поверхностью. Это позволяет увеличить использование солнечной радиации рано утром и в конце дня. Требованиям к вакуумным коллекторам является также их механическая прочность. Дождь, снег и незначительный град неопасны для таких видов коллекторов. Температура нагрева в таких коллекторах может достигать более 200 °С [Мак81].

*Фокусирующие (концентрирующие) коллекторы.* Фокусирующие коллекторы используют оптические системы – *отражатели (зеркала)* или *линзы* для увеличения плотности солнечной радиации на поверхности, поглощающей энергию. Благодаря увеличению плотности солнечной радиации можно получить более высокую температуру нагрева поглощающей поверхности. Система линз не используется для больших солнечных установок из-за большой их стоимости.

Для больших солнечных установок используются исключительно отражатели, т.е. зеркала. Отражатели должны всегда следить за движением солнца, потому что отражатели концентрируют только прямую радиацию.

Фокусирующий коллектор состоит из *приемника* и *концентратора*.

*Концентратор* – это оптическая система (отражатели или линзы), направляющие поток излучения на приемник. *Приемник* – это часть фокусирующего коллектора, поглощающего излучение и преобразующего его в другой вид энергии [Тва90].

Для характеристики концентрирующих солнечных систем используют понятие «коэффициент концентрации». *Коэффициент концентрации (C)* – это отношение площади концентратора ( $A_k$ ) к площади приемника ( $A_{np}$ ):

$$C = \frac{A_k}{A_{np}} \quad (3.2)$$

Максимальная теоретическая концентрация солнечной радиации равна:

$$C_{\max} = \frac{1}{\Theta_s^2} = 46211, \quad (3.3)$$

где  $\Theta_s = 0,27^\circ$  полуугол, под которым с Земли наблюдается солнечный диск. Если система солнечного слежения происходит по одной оси на линейный приемник, то максимальная концентрация равна:

$$C_{\max} = \sqrt{C_{\max}} = 215. \quad (3.4)$$

Данные коэффициенты концентрации действительны лишь для планеты Земля с полууглом, под которым виден солнечный диск. Для других планет, которые дальше удалены от Солнца, чем планета Земля, теоретически достижимы более высокие концентрации.

Благодаря концентрации солнечной энергии, возможно достижение высоких температур, которые могут измеряться тысячами градусов по Цельсию. Если предположить, что на абсорбер (приемник) с максимальным теоретическим концентратором (46211) направляется солнечная энергия, то в этом случае достигается максимальная температура абсорбера. Для упрощения расчета пренебрежем конвекцией и теплопроводностью и предположим, что потеря энергии абсорбера происходит только за счет излучения, тогда можно составить уравнение баланса:

$$C_{\max} \cdot G_c = \sigma \cdot T_{\max}^4, \quad (3.5)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}^4)$  - постоянная Больцмана;  $G_c = 1353 (\text{Вт}/\text{м}^2)$  - солнечная постоянная.

Из соотношения определяем максимальную теоретическую температуру абсорбера:

$$T_{\max} = \sqrt[4]{\frac{C_{\max} \cdot G_c}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{46211 \cdot 1353}{5,67 \cdot 10^{-8}}} = 5762 (K). \quad (3.6)$$

Температура 5762 К соответствует температуре поверхности Солнца, однако, в реальности температуры, получаемые с помощью концентраторов не достигают температуры поверхности Солнца. На графике приведены теоретически возможные температуры, в зависимости от коэффициента концентрации (рис.3.5) [Str07].



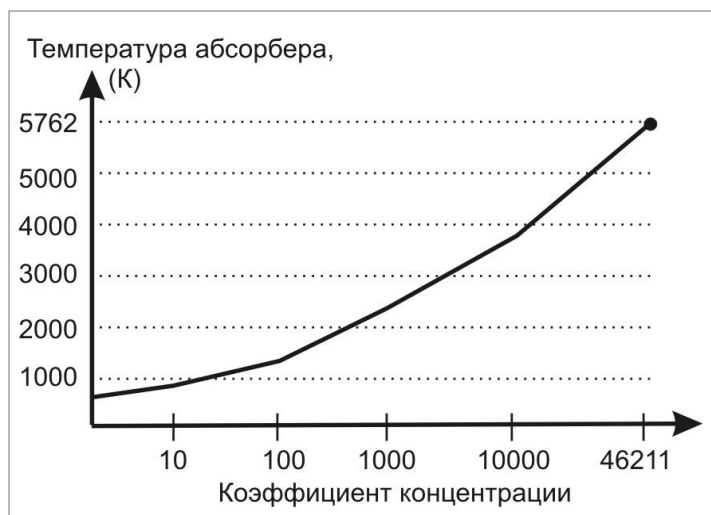


Рис. 3.5. Теоретически возможные температуры абсорбера в зависимости от коэффициента концентрации

Различают следующие фокусирующие коллекторы (рис.3.6) [Тва90]:

- а) плоский приемник и плоский отражатель (коэффициент концентрации  $C=2\dots15$ );
- б) параболический концентратор ( $C=100\dots5000$ );
- в) концентратор Френеля (линзы Френеля,  $C=20\dots80$ );
- г) и др. (конический отражатель, цилиндрический приемник ( $C=1\dots3$ ), линза Френеля с приемником( $C=10\dots40$ )).

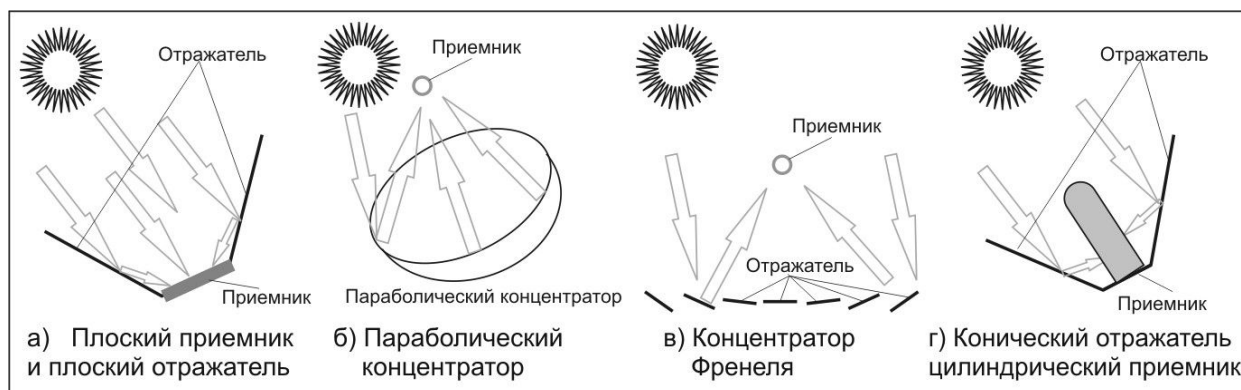


Рис.3.6 Типы фокусирующих коллекторов

Концентрация солнечной энергии возможна лишь в тех регионах, где преобладает прямая радиация. Местность, где прямая радиация составляет лишь 50% глобальной радиации, следует ограничить использование концентрирующих коллекторов, т.к. концентрировать можно лишь прямую радиацию.

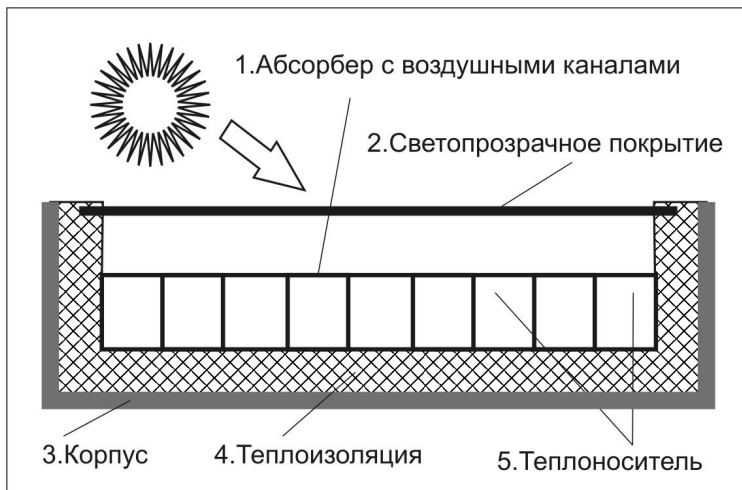


Рис.3.7 Конструкция воздушного коллектора

Однако, воздушному коллектору не грозит проблема, связанная с перегревом теплоносителя, его охлаждением и коррозией, поэтому конструкция воздушных коллекторов значительно проста по сравнению с водяными коллекторами. Даже незначительная утечка теплоносителя не так проблематична, как для жидкостных коллекторов. Недостатком воздушных коллекторов зачастую является значительная мощность устанавливаемых вентиляторов, необходимых для создания циркуляции в воздушном коллекторе.

Воздушные коллекторы применяются для отопления зданий, а также для горячего водоснабжения (рис.3.7) [Str07]. Имеются воздушные коллекторы со светопрозрачной изоляцией и без нее.

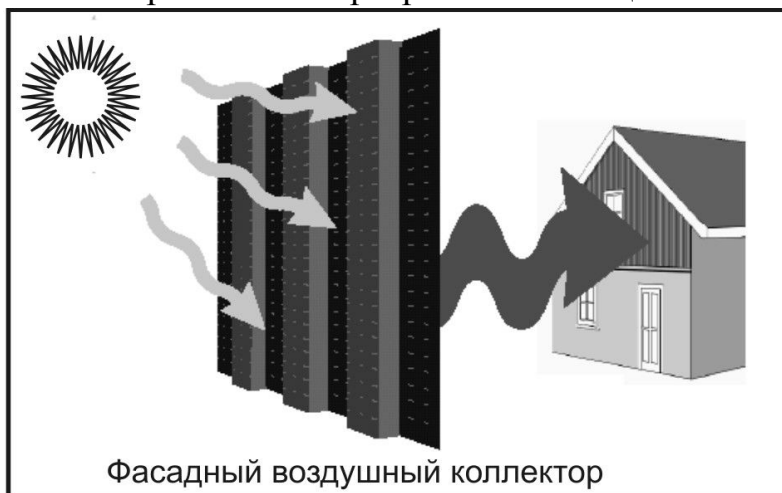


Рис.3.8 Фасадный воздушный коллектор

### **Воздушные коллекторы.**

Воздушные коллекторы, как уже было отмечено выше, отличаются тем, что в качестве теплоносителя здесь используется воздух. Из-за низкого коэффициента теплопередачи между поверхностью абсорбера и теплоносителем (воздух) необходимо иметь значительно большую площадь теплообмена.

Воздушные коллекторы без изоляции представляют собой гофрированные, перфорированные листы металла, которые предназначены как для монтажа на крыше, так и на фасаде здания (рис.3.8).

### **3.1.2 Тепловой баланс и характеристики солнечного коллектора**

Энергия, преобразуемая солнечным коллектором площадью  $A$  [м<sup>2</sup>] и при мощности суммарной приходящей солнечной радиаций  $G_{gl}$  [Вт/м<sup>2</sup>] равна:

$$Q_{кол} = \tau \cdot \alpha \cdot G_{gl} \cdot t \cdot A - Q_{изл} - Q_{мен} - Q_{кон}, \quad (3.7)$$

где  $Q_{кол}$  - энергия, преобразованная солнечным коллектором, Дж;  $\tau$  - коэффициент трансмиссии светопрозрачного покрытия солнечного коллектора;  $\alpha$  - коэффициент абсорбции солнечного коллектора;  $t$  - промежуток времени работы солнечного коллектора, с;  $Q_{изл}$  - тепловые потери солнечного коллектора за счет излучения, Дж;  $Q_{мен}$  - потери солнечного коллектора за счет теплопроводности, Дж;  $Q_{кон}$  - потери солнечного коллектора за счет конвективного теплообмена с окружающей средой, Дж.

Как видно из уравнения (3.7), коллектор, преобразуя солнечную радиацию и передавая ее теплоносителю, теряет энергию также за счет известных процессов теплопередачи: за счет излучения, конвекции и теплопроводности.

Энергия, теряемая за счет излучения:

$$Q_{изл} = \varepsilon_{абс} \cdot A \cdot \sigma (T_{абс}^4 - T_{неба}^4), \quad (3.8)$$

где  $\varepsilon_{абс}$  - коэффициент эмиссии абсорбера солнечного коллектора,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  постоянная Больцмана,  $Вт/м^2 \cdot К^4$ ;  $T_{абс}$  - температура абсорбера солнечного коллектора, К;  $T_{неба}$  - температура небосвода над солнечным коллектором, К.

Энергия, теряемая за счет теплопроводности и конвективного теплообмена:

$$Q_{мен} + Q_{кон} = A \cdot U_m (T_{абс} - T_{окр}), \quad (3.9)$$

где  $U_m$  - коэффициент тепловых потерь за счет конвекции и теплопередачи при заданной скорости ветра  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $T_{окр}$  - температура окружающей среды, К.

Мерой совершенства солнечного коллектора является коэффициент полезного действия ( $\eta_k$ ), определяемый как отношение тепловой мощности солнечного коллектора и приходящего солнечного излучения, падающего на коллектор:

$$\eta_k = \frac{Q_{кол}}{G_{gl} \cdot A \cdot t} = \tau \cdot \alpha - \frac{U_m}{G_{gl}} \cdot (T_{абс} - T_{окр}) - \frac{\varepsilon_{абс} \cdot \sigma (T_{абс}^4 - T_{неба}^4)}{G_{gl}}. \quad (3.10)$$

Для графического отображения характеристик коэффициента полезного действия коллекторов, уравнение упрощается до вида:

$$\eta_k = \tau \cdot \alpha - U_{мен} \frac{(T_{абс} - T_{окр})}{G_{gl}} = \eta_0 - U_{мен} \frac{(T_{абс} - T_{окр})}{G_{gl}}, \quad (3.11)$$

где  $\eta_0 = \tau \alpha$  - оптический КПД солнечного коллектора;  $U_{мен}$  - обобщенный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора  $Вт/м^2 \cdot К$ .

Упрощенное уравнение (3.11) показывает, что КПД солнечного коллектора зависит от двух составляющих – оптического КПД и тепловых потерь.

Оптический КПД - это произведение коэффициентов трансмиссии и абсорбции солнечного коллектора. Если принять, что температура окружающей среды равна температуре абсорбера, то вторая составляющая становится, равной нулю. В этом случае солнечный коллектор достигает максимального КПД, равного оптическому КПД. Оптический КПД зависит лишь от материала коллектора и показывает, насколько усовершенствованы коэффициенты трансмиссии и абсорбции.

Вторая составляющая – тепловые потери зависит от разницы температур абсорбера и окружающей среды, а также от мощности солнечного излучения. Температура в точке пересечения кривой КПД коллектора с осью X - это максимальная температура коллектора, при которой вся приходящая энергия идет на покрытие потерь (КПД равен 0).

На рис.3.9 показаны характеристики КПД для плоского коллектора при различной мощности солнечного излучения. Из графиков видно: чем ниже приходящая солнечная радиация, тем круче кривая КПД коллектора.

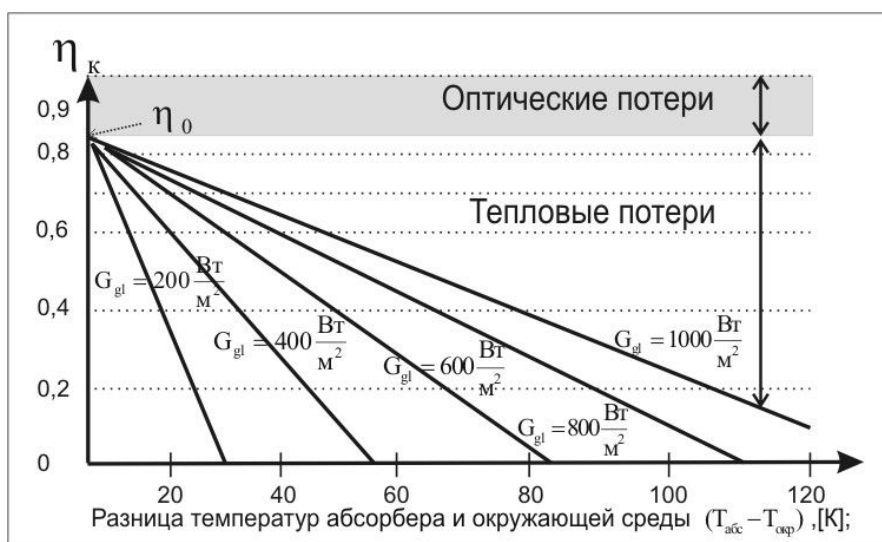


Рис.3.9 Характеристики КПД для плоского коллектора в зависимости от приходящей солнечной радиации

На рис.3.10 представлены кривые характеристики КПД различных типов жидкостных коллекторов. Как видно, из-за отсутствия стекла (т.о.  $\tau = 1$ ) самым большим оптическим КПД обладает абсорбер. Можно сделать вывод, что для нагрева воды, температура которой незначительно превышает температуру окружающего воздуха, идеально подходит абсорбер. Для достижения высоких температур следует применять вакуумный коллектор, эффективность которого для этих целей максимальная.

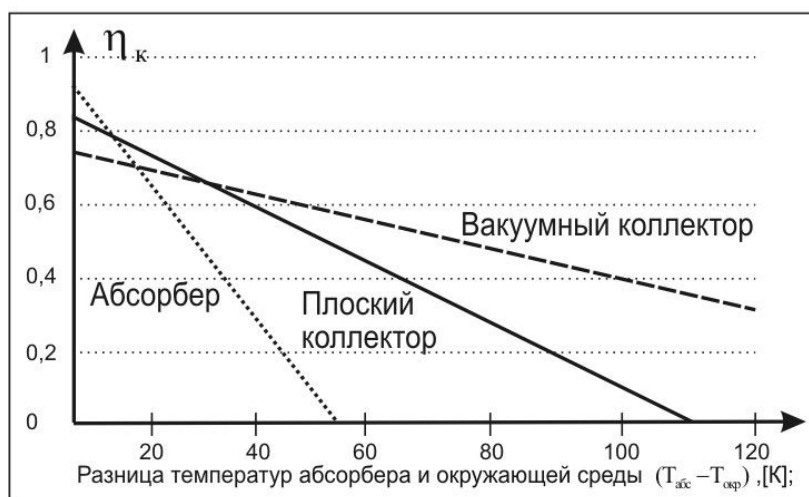


Рис.3.10 Характеристики КПД для различных типов солнечных жидкостных коллекторов

### 3.1.3 Бак-аккумулятор

График потребности энергии не всегда совпадает с графиком приходящей солнечной радиации, поэтому необходимо запастись энергией в баках-аккумуляторах. Бак-аккумулятор является необходимой составной частью солнечной тепловой установки для горячего водоснабжения или комбинированной установки. Основной функцией бака-аккумулятора является накопление энергии.

На рис.3.11 [Reb02] показаны вещества, используемые для аккумуляции тепловой энергии. Различают: вещества, аккумулирующие энергию только за счет теплоемкости – «физическое тепло»; материалы, использующие энергию фазовых переходов (твердое вещество – жидкость, твердое – газообразное вещество) – «скрытое тепло»; а также тепло от химических реакций. В солнечных тепловых системах для горячего водоснабжения и отопления применяются зачастую водяные баки-аккумуляторы, использующие воду в качестве аккумулирующего вещества. Водяной бак-аккумулятор представляет собой изолированную емкость, заполненную водой. Галечный бак-аккумулятор применяется для аккумуляции энергии и используется совместно с воздушными системами солнечного отопления. На исследовательском уровне находятся баки-аккумуляторы, использующие материалы с фазовым переходом. Основным преимуществом подобных баков-аккумуляторов является их компактность.

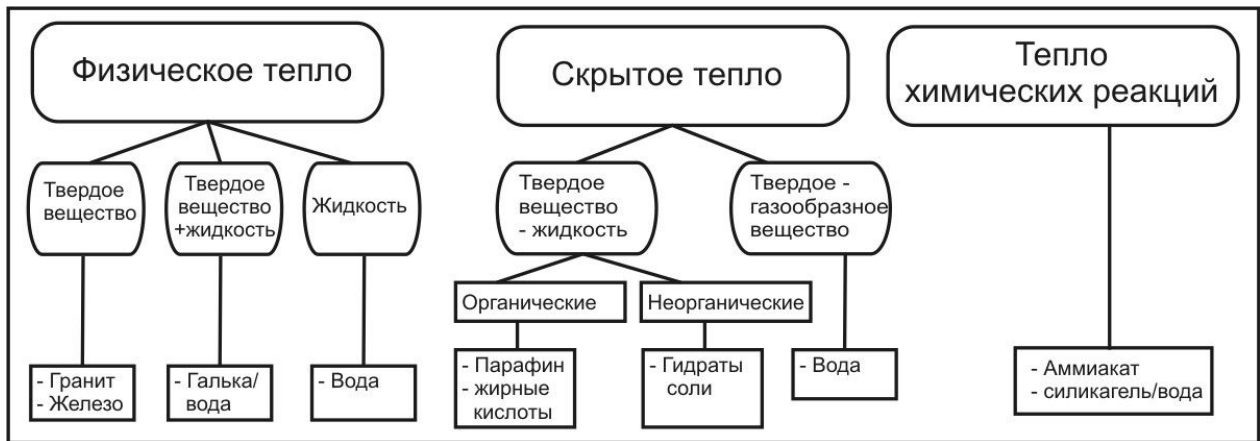


Рис.3.11 Классификация материалов используемых для аккумуляции тепловой энергии

Бак-аккумулятор, использующий «физическое тепло». Для применения солнечных установок в быту разработаны водяные, галечные и другие аккумулирующие системы. Объем (емкость) аккумулированной энергии зависит от массы материала, температуры и коэффициента теплоемкости. Для материалов, используемых в подобных баках-аккумуляторах, важное значение имеют коэффициент теплоемкости и объемный коэффициент теплоемкости (или плотность вещества). К примеру, если взять бак-аккумулятор емкостью 1000 литров, использующий воду в качестве аккумулирующего материала, то можно сохранить 205 МДж, нагрев воду с 20 °С до 70 °С (78):

$$Q_{\text{воды}} = c_{\text{воды}} \cdot m_{\text{воды}} \cdot \Delta T_{\text{воды}} = c_{v,\text{воды}} \cdot V_{\text{воды}} \cdot \Delta T_{\text{воды}} = 4100 \cdot 1 \cdot 50 = 205 \cdot 10^3, \quad (3.12)$$

где  $Q_{\text{воды}}$  - запасенная энергия в воде, кДж;  $c_{\text{воды}}$  - удельная теплоемкость воды, кДж/кг·К;  $c_{v,\text{воды}} = c_{\text{воды}} \cdot \rho_{\text{воды}}$  - объемная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $\rho_{\text{воды}}$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{\text{воды}}$  - масса воды, кг;  $V_{\text{воды}}$  - объем воды, м<sup>3</sup>;  $\Delta T_{\text{воды}}$  - разница температур воды, К.

В табл. 3.2 [Reb02] приведены различные материалы, их температурные промежутки применения и удельная и объемная теплоемкости. Объемная теплоемкость также является важным параметром материала, так как большая энергетическая емкость и маленький объем означает компактность бака-аккумулятора. Особенно в последнее время огромную важность имеет создание сезонных аккумуляторов, обладающих значительной энергоемкостью, но занимающих маленький объем, для экономии пространства в доме.

## Материалы и их физические свойства

Наименование материала	Применение при температуре, °С	Удельная Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Объемная Теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)
Вода (1 бар)	0-100	4,19	4100
Вода (100 бар)	0-180	4,19	3700
Вода/этиленгликоль	-10-100	3,5	3500
Вода/раствор натра (50% /50%)	20-140	3,3	5060
Раствор нитрата	150-450	1,3	2300
Жидкий натрий	110-800	1,3	940
Галька/песок	до 700	1,3	1900
Гранит	до 800	0,75	2050
Бетон	до 500	0,9	1800
Алюминий	до 600	0,92	2500
Медь	до 1000	0,39	3200
Чугун	до 1000	0,55	3900
Сталь	до 1000	0,46	3600
Шамот/огнеупорный материал	до 1200	1,0	2300

Одним из распространенных баков-аккумуляторов в солнечных установках является *водяной бак-аккумулятор*. В настоящее время в большинстве случаев используются водяные баки-аккумуляторы, позволяющие аккумулировать энергию на несколько дней, а также используются сезонные баки-аккумуляторы, позволяющие запастись энергией в летнее время и использовать ее зимой. На рис.3.12 [VAJ08] (слева) показан бак-аккумулятор солнечной тепловой установки, предназначенной для горячего водоснабжения. Энергия, получаемая за счет преобразования солнечной радиации по «солнечному контуру» через внутренний теплообменник, передается в бак-аккумулятор. Теплообменник солнечного контура располагается в нижней части бака-аккумулятора, тем самым позволяя эффективно нагревать весь объем бака. С другой стороны, за счет *стратификации* (расслоение воды по температурам) обеспечивается низкая температура на входе в коллектор, тем самым, повышается его эффективность.

*Стратификация* является одним из важных механизмов создания эффективного использования бака-аккумулятора. Расслоение воды по температурам происходит за счет естественных физических свойств воды - уменьшение плотности воды с ростом температуры. Вода, нагреваясь в баке-аккумуляторе естественным образом распределяется, так что менее нагретая вода расположена в нижней части бака-аккумулятора, а нагретая - в верхней части. Прямая подача холодной воды и потребление нагретой воды из бака-

аккумулятора разрушают слои, поэтому имеется ряд приспособлений, позволяющих сохранить расслоение в баке-аккумуляторе.

Объем бака-аккумулятора, расположенный ниже теплообменника солнечного контура, называется мертвым объемом. Объем воды, расположенной в «мертвом объеме», не участвует для накопления энергии, поэтому при проектировании водяных баков-аккумуляторов он должен быть наименьшим. Объем бака-аккумулятора от мертвого объема до теплообменника дополнительной топки представляет собой объем, нагреваемый только за счет солнечной энергии. Этот объем является наибольшим в баке-аккумуляторе. Объем воды от теплообменника контура дополнительной топки до верхнего основания представляет объем для дополнительной топки, который нагревается помимо солнечной радиации также за счет газовой горелки, электричества. Расположение теплообменника контура дополнительной топки позволяет догреть воду в верхней части бака-аккумулятора до температуры, необходимой для подачи потребителю. Как видно из рисунка, нагрев за счет топки-дублера (электричество, газ и т.д.) происходит не для всего бака-аккумулятора, а лишь его верхней части.

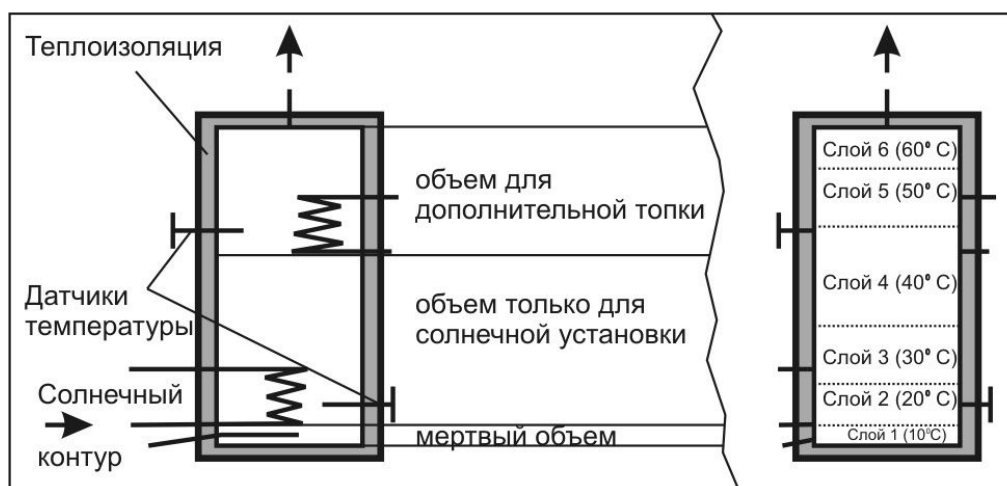


Рис.3.12 Бак-аккумулятор и его зоны (справа) и стратификация воды (слева)

*Бак-аккумулятор, использующий «скрытое тепло».* Под скрытым теплом понимается энергия, необходимая для превращения одного агрегатного состояния в другой для данного материала, которое проходит при постоянной температуре. Из школьного курса физики известно, что опасней обжечься 100 °С водяным паром, чем 100 °С горячей водой в связи с тем, что в паре содержится энергия парообразования воды. Чтобы расплавить 1 кг льда и превратить его в воду с температурой 0 °С, необходимо почти такое же количество энергии, чтобы нагреть воду с 0 °С до 80 °С. Преимуществом баков-аккумуляторов, использующих энергию фазового перехода, является их значительная энергоемкость при постоянной температуре. Для материалов с переходом агрегатного состояния (фазовый переход) важное значение имеют энергия фазового перехода и температура, при котором он происходит. В табл.3.3 [Reb02] приведены некоторые материалы с характеристиками фазового перехода.



Табл. 3.3

## Материалы с фазовым переходом

Наименование материалов	Температура фазового перехода (плавление), °С	Энергия плавления, кВт час/м <sup>3</sup>
Вода	0	93
Гидрат соли	10-110	60-170
Парафин	20-70	40-45
Жирные кислоты	15-70	30-50
Нитраты	150-300	60-190
Гидрооксид	170-400	130-190
Хлорид	380-800	160-250
Карбонат	400-900	160-360
Соли фтористоводородной кислоты	690-1260	300-800

При проектировании баков-аккумуляторов, использующих энергию фазовых переходов, необходимо технически учитывать изменение объема при фазовом переходе. К примеру, вода замерзая в лед, расширяется на 20%.

*Тепло химических реакций.* Обратимые химические реакции дают возможность аккумулировать тепловую энергию различных источников как Солнце, отходы тепловой энергии на тепловых станциях. При обратимых химических реакциях энергия процесса может быть аккумулирована в виде химической энергии. Например, силикагель поглощает воду, при этом выделяется скрытая энергия парообразования воды, а при обратном процессе для извлечения воды из силикагеля необходимо подвести тепловую энергию. К обратимым химическим системам, которые по термодинамическим критериям хорошо пригодны к аккумулированию, относятся *системы Гибридов металл-металл*. Особенностью таких систем аккумулирования тепла является дополнительное выделение водорода во время заряда бака-аккумулятора. Водород, в свою очередь, можно рассматривать как источник энергии, поэтому такая система накапливает тепло и вырабатывает энергоноситель. В таблице 3.4 [Reb02] приведены примеры гибридов металл-металл систем.

Табл.3.4

## Данные некоторых обратимых гибридов металл-металл систем

	Содержание H <sub>2</sub> , %	Температура распада и давление	Концентрация энергии, кДж/кг	
			Тепловой аккумулятор	H <sub>2</sub> -накопитель
<i>FeTiH<sub>1,93</sub> – FeTi</i>	1,8	20 °С, 3,5 бар	300	2700
<i>LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub> – LaNi<sub>5</sub></i>	1,4	20 °С, 2 бар	200	1700
<i>Mg<sub>2</sub>NiH<sub>4</sub> – MgNi</i>	3,8	245 °С, 1 бар	1260	4600
<i>MgH<sub>2</sub> – Mg</i>	7,6	284 °С, 1 бар	3080	9000

### 3.1.4 Другие компоненты солнечного контура

Солнечный контур - это совокупность компонентов, расположенных в контуре с солнечным коллектором. По солнечному контуру происходит передача солнечной энергии, преобразованной солнечным коллектором в бак-аккумулятор при помощи теплоносителя, протекающего в трубопроводах. На рис.3.13 [ВАК08] представлена солнечная установка, предназначенная для горячего водоснабжения. В состав солнечного контура входят солнечный коллектор (1) и водяной бак-аккумулятор (2), которые необходимы соответственно для преобразования и накопления солнечной энергии.

*Циркуляционный насос (4)* создает циркуляцию теплоносителя по солнечному контуру, благодаря чему солнечная энергия передается от солнечного коллектора в бак-аккумулятор. Для солнечных систем горячего водоснабжения на циркуляционный насос затрачивается порядка 2% электроэнергии от солнечной энергии, поставляемой в бак-аккумулятор. Циркуляционный насос выбирается в зависимости от гидравлического сопротивления всего солнечного контура. Насос рекомендуется устанавливать перед солнечным коллектором. Современные насосы, применяемые для солнечных контуров, имеют несколько ступеней мощности (оборотов), обычно 3-4. Подобное регулирование мощности насоса позволяет варьировать расход теплоносителя в солнечном контуре.

*Воздухосбросник (5)* предназначен для удаления воздуха из солнечного контура.

Воздухосбросники должны быть расположены в высшей точке солнечного контура и, при необходимости, в сложных перегибах. При заполнении солнечного контура теплоносителем через сливной вентиль (10) воздухосбросники должны находиться в открытом положении.

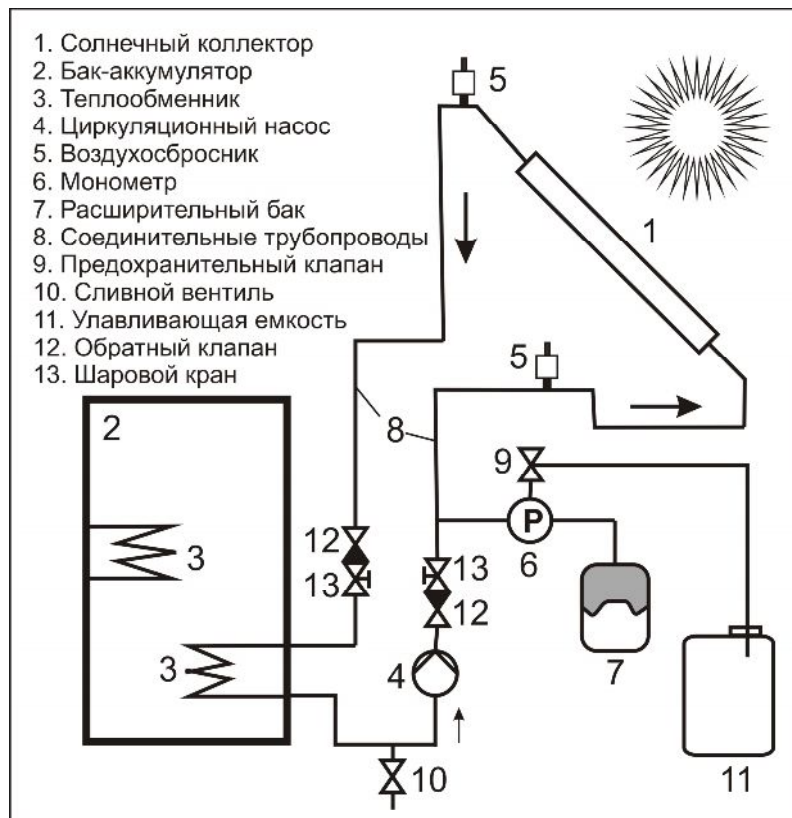


Рис.3.13 Компоненты солнечного контура солнечной установки для горячего водоснабжения

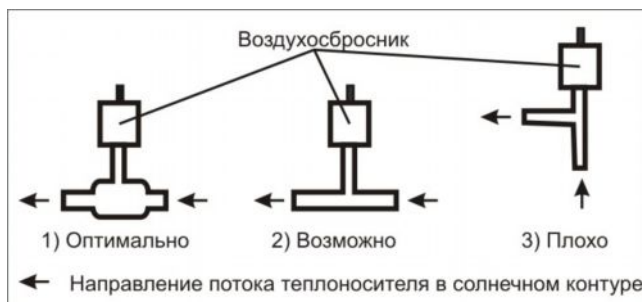


Рис.3.14 Возможное расположения воздухосбросника в солнечном контуре

По мере наполнения солнечного контура теплоносителем, воздух будет вытравливаться через воздухосбросники, после заполнения контура воздухосбросники закрываются. В течение первых дней рекомендуется так же производить сброс

воздуха через воздухосбросники. Это связано, что с увеличением температуры растворимость воздуха в жидкости падает.

Воздухосбросник рекомендуется устанавливать в местах с благоприятными условиями отделения воздуха от жидкости. На рис.3.14 [Str07] изображены три разных варианта подключения воздухосбросника в солнечный контур. Третий случай не рекомендуем и обозначаем как «плохо», второй случай возможен, первый случай является оптимальным в связи с тем, что в месте расположения воздухосбросника наблюдается наименьшая скорость теплоносителя.

*Манометр (6)* измерительный прибор, предназначенный для измерения давления в контуре. Для бытовых солнечных установок горячего водоснабжения рабочее давление составляет порядка 3 бар (1 бар =  $10^5$  Па).

Расширительный бак (7) является необходимым компонентом солнечной установки, объем которого должен учитывать температурное расширение всего объема теплоносителя солнечного контура, а также возможности парообразования в солнечном коллекторе в результате прекращения функционирования циркуляционного насоса. Объем расширительного бака можно посчитать следующим образом:

$$V_{рб} = V_{рас} + V_{пр} + V_{рез}, \quad (3.13)$$

где  $V_{рб}$  - объем расширительного бака,  $м^3$ ;  $V_{рас}$  - объем, связанный с тепловым расширением всего теплоносителя солнечного контура,  $м^3$ ;  $V_{пр}$  - объем связанный с возможным парообразованием теплоносителя в результате остановки циркуляционного насоса,  $м^3$ ;  $V_{рез}$  - резервный объем, поддерживающий работу расширительного бака при больших давлениях,  $м^3$ .

Расчет трех выше указанных объемов ведется по следующим формулам:

$$V_{рас} = \frac{(\rho_{хол} - \rho_{гор})}{\rho_{гор}} \cdot V_{сол.к.} = (0,07 \div 0,1) \cdot V_{сол.к.}, \quad (3.14)$$

где  $V_{сол.к.}$  - объем теплоносителя в солнечном контуре,  $м^3$ ;  $\rho_{хол}$  - плотность теплоносителя в холодном состоянии,  $кг/м^3$ ;  $\rho_{гор}$  - плотность теплоносителя в нагретом состоянии,  $кг/м^3$ ;

$$V_{пр} = 1,1 \cdot V_{кол}, \quad (3.15)$$

где  $V_{кол}$  - объем теплоносителя в солнечном коллекторе,  $м^3$ ;

$$V_{рез} = (0,01 \div 0,1) \cdot V_{сол.к.} \quad (3.16)$$

На рис.3.15 [Str07] показаны правильное и неправильное подключения расширительного бака в солнечный контур. Необходимо подключать расширительный бак таким образом, чтобы нагретый теплоноситель не достигал мембраны. Поэтому зачастую расширительный бак находится в «подвешенном» состоянии и исключительно перед входом в солнечный коллектор. По мере нагревания плотность теплоносителя падает, соответственно повышается его объем теплоносителя. Расширившийся теплоноситель, давит на мембрану, сжимая азот или воздух в расширительном баке. Чем выше температура теплоносителя в солнечном контуре, тем ниже положение мембраны. С помощью вентиля можно отрегулировать давление азота или воздуха в солнечной установке.

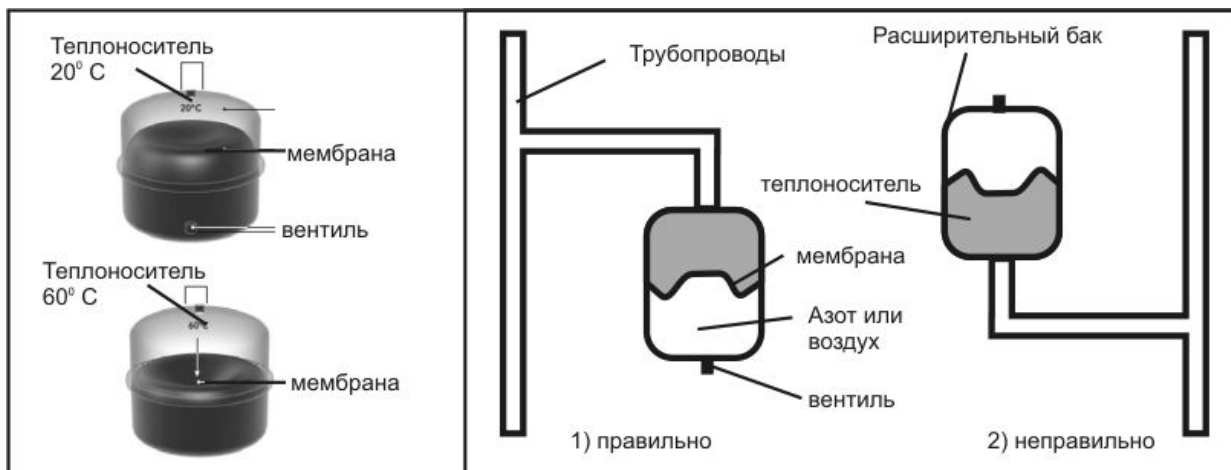


Рис.3.15 Подключение расширительного бака в солнечный контур

*Станция солнечного контура* представляет собой компактно собранный элемент, включающий в себя: насос, обратный клапан, манометр, предохранительный клапан, расширительный бак [Wag09]. Станция солнечного контура очень удобна и компактна при монтаже солнечной установки.

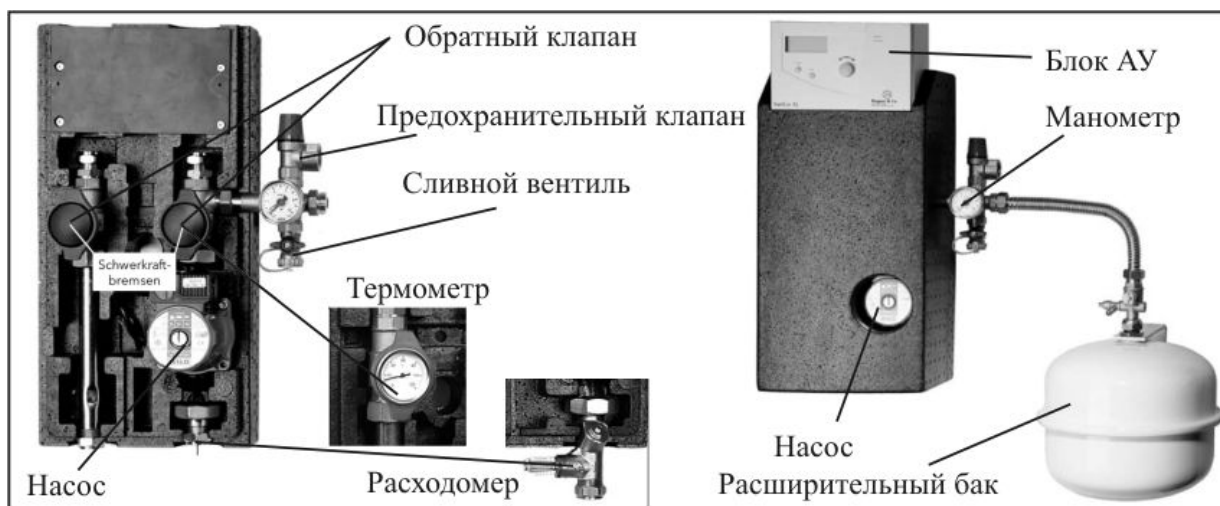


Рис.3.16 Станция солнечного контура

Блок АУ (автоматизированное управление) – это так называемый «мозг» станции солнечного контура, который отвечает за контроль и управление солнечной установкой, благодаря чему достигается ее эффективная работа. Например, блок АУ сравнивает температуры с датчиков бака-аккумулятора и выхода с коллектора и с помощью реле включает или отключает циркуляционный насос.

*Трубопроводы* (8) соединяют отдельные компоненты солнечного контура, в частности, солнечный коллектор с баком-аккумулятором. Материал трубопроводов зависит от габаритов солнечной установки, а также от солнечного коллектора. Для солнечных установок горячего водоснабжения рекомендуются медные трубопроводы, которые являются

коррозийстойкими, а также долговечными и хорошо выдерживают высокие температуры. *Даже если проектируемая солнечная установка рассчитана на максимальную температуру теплоносителя не выше 90 °С, не рекомендуется устанавливать металлопластиковые трубопроводы. За счет перепада температур теплоносителя места стыков металлопластиковых труб становятся менее плотными, что приводит к утечке теплоносителя. Трубопроводы солнечного контура обязательно должны быть теплоизолированными.*

*Предохранительный клапан (9)* необходим для солнечных установок, особенно для комбинированных солнечных систем отопления и горячего водоснабжения. Предохранительный клапан должен автоматически открыться при достижении критического давления в солнечном контуре, во избежание повреждения отдельных компонентов солнечной установки. При стагнации повышается давление в солнечном контуре, на что в первую очередь реагирует расширительный бак, который сглаживает давление, но если давление выше критического (обычно для установок горячего водоснабжения 4-6 бар), то открывается предохранительный клапан, через него выходит теплоноситель в жидком или газообразной состоянии и попадает в *улавливающую емкость (11)*. Между солнечным коллектором и предохранительным клапаном не должны располагаться другие компоненты, способные создавать затор, например, шаровой вентиль. Трубопроводы, соединяющие предохранительный клапан (9) и улавливающую емкость, могут быть без теплоизоляции.

*Сливной вентиль (10)* расположен в самой низкой части солнечного контура. Через сливной вентиль происходит заполнение солнечного контура, а также его опорожнение (слив). При заполнении и опорожнении солнечного контура воздухоотводчики должны находиться в открытом состоянии для вытравливания воздуха.

*Обратный клапан (12)* обеспечивает движение теплоносителя только в одном направлении. В ночное время в солнечном контуре при заряженном баке-аккумуляторе может возникнуть естественная циркуляция (рис.3.17) [VAJ08]. Теплоноситель, нагреваясь за счет энергии, накопленной в баке-аккумуляторе, устремляется вверх. Протекая по солнечному коллектору, энергия за счет излучения, теплопроводности и конвекции теряется в окружающую среду, тем самым за счет естественной циркуляции происходит ночная разрядка бака-аккумулятора. Для избежания подобных тепловых потерь служит обратный клапан, обеспечивающий пропуск теплоносителя только в одном направлении.

*Шаровой кран (13)* позволяет проводить профилактику, ремонт компонентов, заключенных между шаровыми кранами, не опорожняя установку. Насос является одним из таких компонентов.

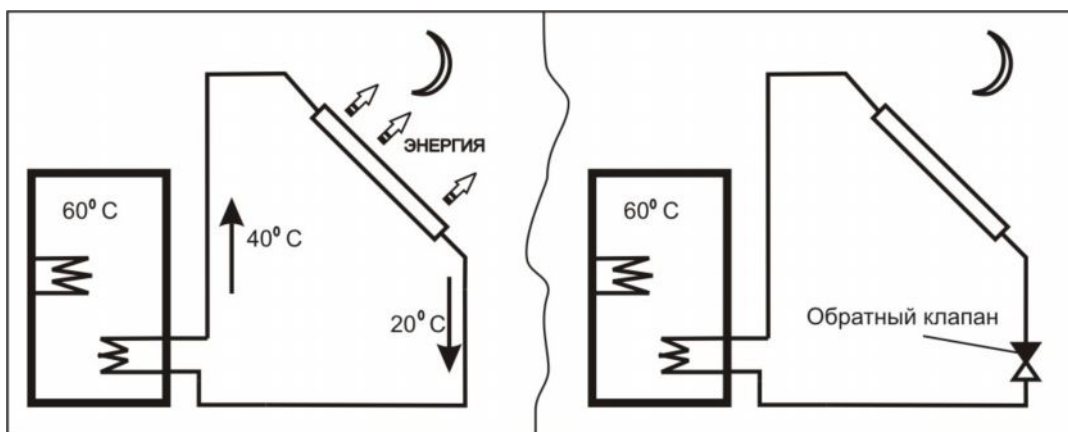


Рис.3.17 Ночная разрядка бака аккумулятора и ее отсутствие при установке обратного клапана

### 3.2 Солнечные тепловые установки

Солнечные тепловые установки можно классифицировать по различным критериям. Солнечные тепловые установки позволяют преобразовывать солнечную энергию в тепловую. Солнечные тепловые установки используются для: подогрева бассейнов; горячего водоснабжения; отопления; выработки электричества за счет термодинамического цикла.

*Солнечные тепловые установки для подогрева бассейнов.* Установки подобного типа особенно распространены в США, где частные бассейны очень популярны. Открытые бассейны обычно являются сезонными, то есть зимой не используются. Таким образом, подогрев бассейнов необходим в летний и осенней - весенний периоды, когда приход солнечной радиации максимален. Температура в плавательных бассейнах обычно колеблется около  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Такую температуру можно получить с помощью простого, дешевого и долговечного неостекленного коллектора – абсорбера. Солнечная тепловая установка для подогрева бассейнов состоит лишь из абсорбера и насоса, создающего циркуляцию. На рис. 3.18 представлена солнечная установка для подогрева бассейнов. Как видно, солнечная система очень проста в монтаже и управлении [Sch].

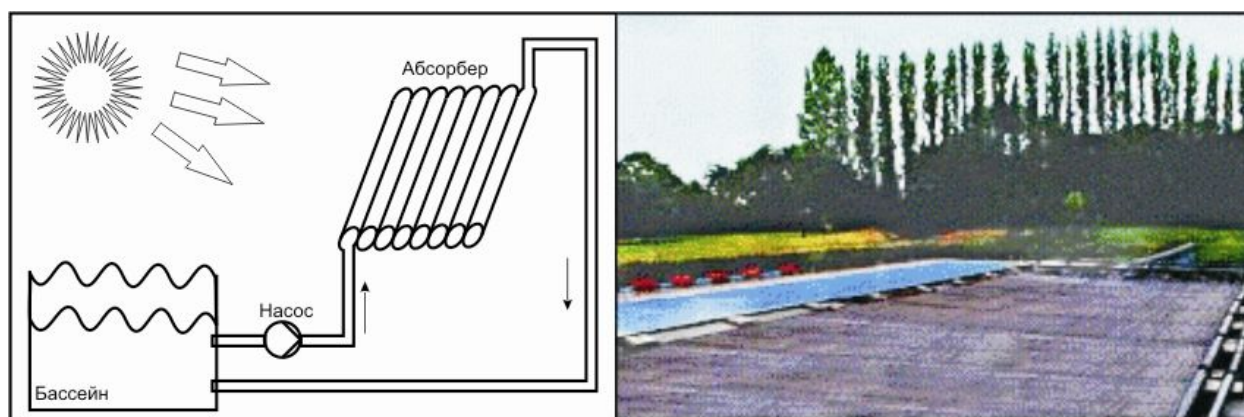


Рис.3.18 Солнечная установка для подогрева воды в бассейнах

*Солнечная система для горячего водоснабжения.* Под системой горячего водоснабжения понимается установка, позволяющая получать горячую воду, используемую в домохозяйстве для стирки, приготовления пищи, душа и т.д. Для горячего водоснабжения необходима вода с более высокой температурой по сравнению с температурой воды в бассейне. Поэтому для горячего водоснабжения в основном используются плоские коллекторы, у которых имеется теплоизоляция. Самой простой солнечной установкой для горячего водоснабжения может считаться емкость, выкрашенная в черный цвет и поставленная на солнце. В сельских местностях особенно хорошо известен данный опыт, где практически каждый житель имеет бочку, в которой вода нагревается в течение дня, а вечером используется для душа. Другим примером является *термосифонная установка* (рис.3.19) [ВАК08] использующая естественную циркуляцию теплоносителя. Особенность конструкции такой солнечной установки основана на физическом явлении, что более нагретая вода обладает меньшей плотностью, а соответственно и легче, чем такой же объем холодной воды. Термосифонная установка состоит из плоского коллектора и бака-аккумулятора, связанных между собой трубопроводами. Обязательным является условие, чтобы нижнее основание бака аккумулятора находилось выше отметки верхней части плоского коллектора. Выход из коллектора должен быть соединен с верхней частью, а вход коллектора соответственно с нижней частью бака-аккумулятора. Потребление горячей воды осуществляется через отводящий трубопровод, а пополнение - через нижний подводный трубопровод.

До восхода солнца циркуляция в термосифонной установке отсутствует. Циркуляция появляется после нагрева теплоносителя (воды) в плоском коллекторе. При нагревании происходит расширение теплоносителя, и часть объема устремляется вверх в бак-аккумулятор. Это приводит к тому, что гидростатическое давление левого трубопровода (коллектор) уменьшается за счет уменьшения плотности воды. Разница давлений правого и левого трубопроводов приводит к появлению естественной циркуляции. В результате вода из нижнего основания бака-аккумулятора устремляется вниз, нагреваясь в коллекторе, - вверх, и таким образом осуществляется естественная циркуляция. Чем больше интенсивность солнечного излучения, тем больше скорость термосифонной циркуляции.

Подобные солнечные тепловые установки распространены в Китае. Вместо плоского коллектора могут быть использованы и вакуумные коллекторы. Недостатком такой системы является ее сезонное использование. В зимнее время такую установку следует опорожнять во избежание повреждения компонентов.

Для круглогодичного горячего водоснабжения применяются солнечные установки с принудительной циркуляцией.



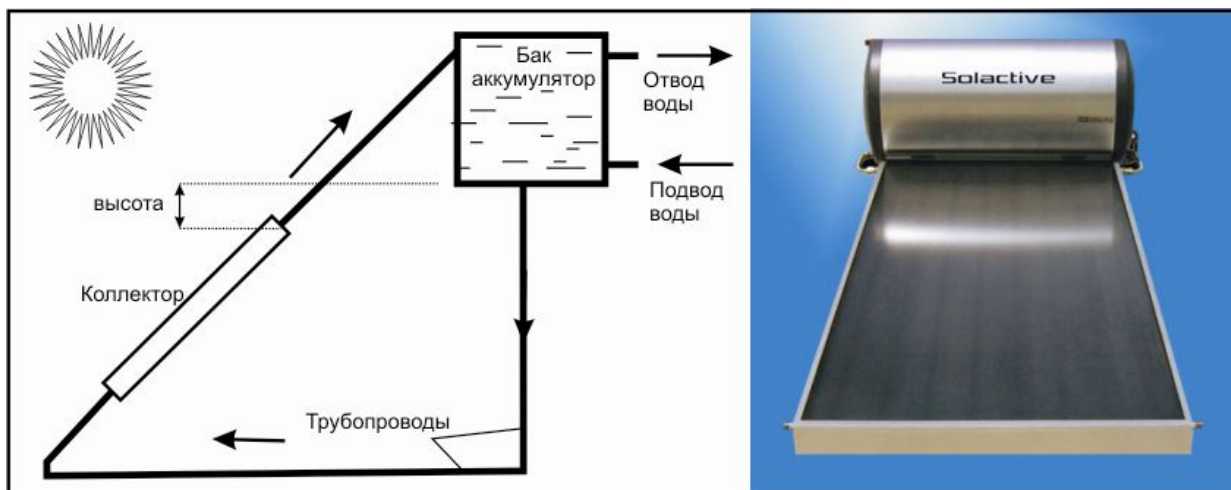


Рис.3.19 Солнечная установка для подогрева воды в бассейнах

*Солнечная установка для горячего водоснабжения с принудительной циркуляцией.*

На примере подобной установки были рассмотрены компоненты солнечного контура (рис.3.1). Как видно из рисунка, в баке-аккумуляторе имеется теплообменник дополнительной топки. Топка обеспечивает потребителю горячую воду, независимо от погодных условий. Благодаря накопленной энергии бака-аккумулятора, в топке происходит нагрев воды до необходимой температуры. Для оценки количества использования солнечной энергии в гелиотехнике используется определение *солнечного замещения*:

$$f_{сол} = \frac{Q_{кол}}{Q_{кол} + Q_{топка}} \cdot 100\%, \quad (3.17)$$

где  $f_{сол}$  - солнечное замещение, %;  $Q_{кол}$  - количество тепловой энергии, полученное за счет солнечной установки, кВт·час;  $Q_{топка}$  - количество тепловой энергии, полученное за счет дополнительной топки, кВт·час.

В зависимости от профиля потребления горячей воды, габаритов солнечной установки, метеорологических факторов солнечное покрытие колеблется в промежутке между нулем и ста процентами. Ноль процентов соответствует режиму, когда горячее водоснабжение осуществляется исключительно за счет традиционной энергии топки. Сто процентов соответствует режиму, когда горячее водоснабжение осуществляется только за счет солнечной энергии. Следовательно, для горячего водоснабжения можно спроектировать солнечную установку, за счет которой можно обеспечивать горячее водоснабжение.

*Комбинированная солнечная тепловая установка* (комби-система) служит для горячего водоснабжения и отопления (рис.3.20) [ВАК08]. Размеры компонентов отличаются от солнечной установки для горячего водоснабжения. Отличие габаритов отдельных компонентов комби-установки и установки для горячего водоснабжения связано разницей тепловых нагрузок. Для комби-системы необходимо большее коллекторное поле с большим углом наклона, а также больший объем бака-аккумулятора.

Комби-система может лишь частично поддерживать традиционную отопительную систему. Традиционная комби-система имеет коэффициент солнечного замещения на отопление порядка 20-30%. Для хорошего теплоизолированного дома можно добиться большего коэффициента солнечного покрытия для комби-системы за счет уменьшения потребности тепловой энергии на отопление.

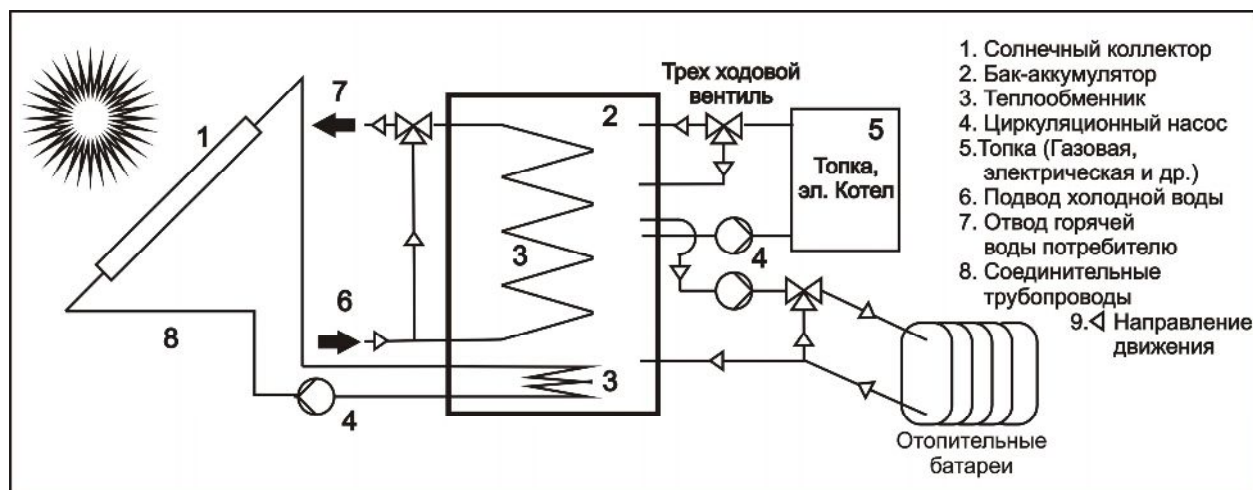


Рис. 3.20 Комбинированная система горячего водоснабжения

Основная причина, что коэффициент солнечного замещения достигает лишь 20-30%, является «противофазность» распределения приходящей солнечной радиации и потребности тепловой энергии. Летом приходящая солнечная радиация максимальна, а потребность тепловой энергии минимальна (лишь горячее водоснабжение), зимой же - наоборот: при минимальной приходящей солнечной радиации потребность в тепле значительна (горячее водоснабжение + отопление).

На рис. 3.21 показан пример изменения величин полученной энергии от увеличения площади солнечного коллектора в два раза. Если принять, что первоначальная солнечная комби-система с площадью солнечного коллектора  $S$  ( $m^2$ ), обеспечивала солнечное покрытие 25% (кривая снизу), то при удвоении площади коллектора солнечное покрытие выросло приблизительно до 35%. Для комбинированных солнечных систем экономическая эффективность использования солнечного коллектора падает при увеличении его площади. Как видно из рисунка, при увеличении площади солнечного коллектора в два раза потребность энергии изменяется незначительно (серая площадь).

*Концентрирующие солнечные системы.* К концентрирующим солнечным системам относятся солнечные установки, использующие концентрацию солнечной энергии. Концентрирующие солнечные системы используются исключительно для получения высоких температур теплоносителя. Основное применение солнечных концентрирующих систем - это промышленность и получение электричества за счет термодинамических

циклов. Известно четыре основных вида концентрирующих солнечных систем для производства электроэнергии [Zar08]: *солнечная система башенного типа, линза Френеля, параболический вогнутый (объемный) концентратор с двигателем Стирлинга, система с плоскими параболическими концентраторами.*

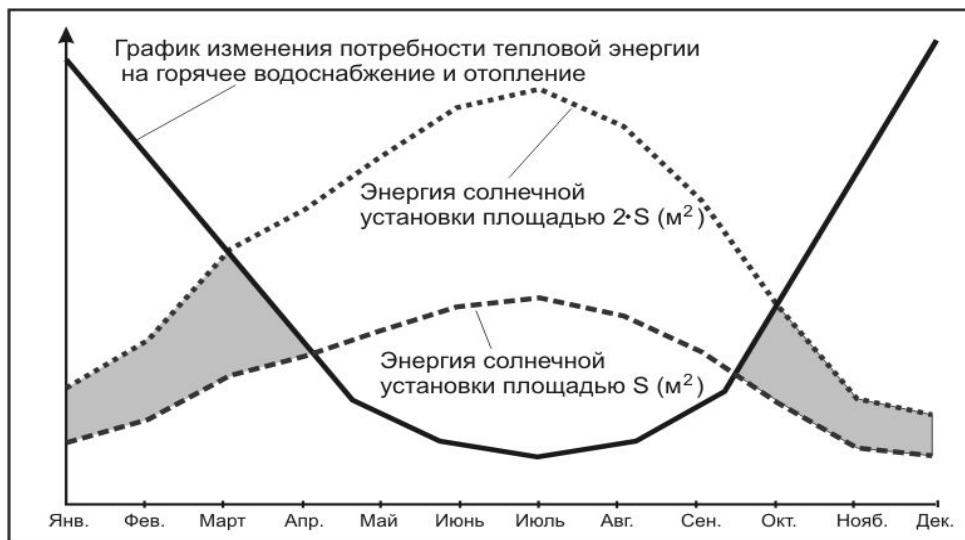


Рис.3.21 Сезонное изменение тепловой нагрузки и приходящей солнечной радиации

*Концентратор Френеля (Линзы Френеля, рис.3.22) [Zar08].* Концентратор Френеля представляет собой очень простую конструкцию. Он состоит из плоских зеркал, способных вращаться независимо друг от друга, и приемника (абсорбера), расположенного над плоскими зеркалами. Несколько прототипов уже существуют и исследуются учеными. Были попытки в фокусе устанавливать и фотоэлектрический-тепловой модуль.

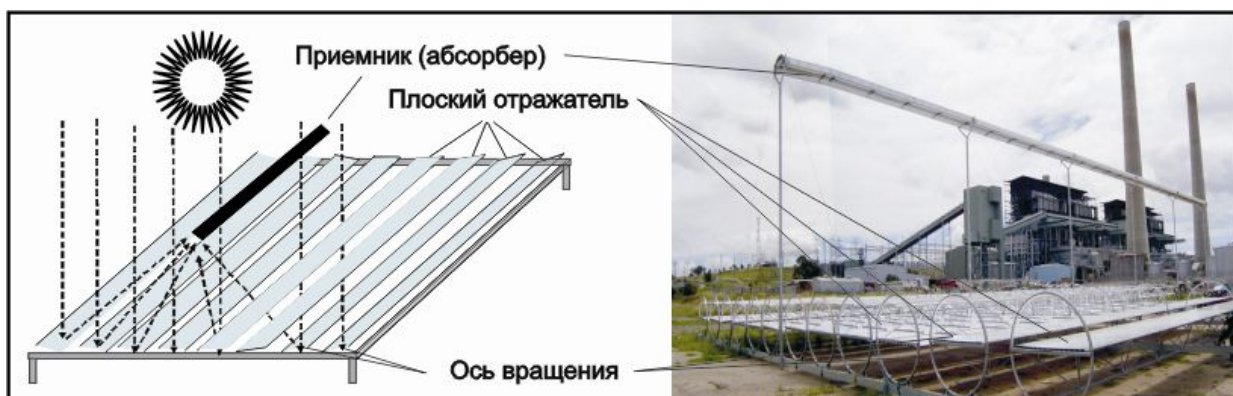


Рис. 3.22 Концентратор Френеля

*Солнечная энергетическая станция башенного типа (рис.3.23) [Zar08].* Подобная станция состоит из центрального приемника, который расположен на вершине башни, и зеркал-гелиостатов, которые отражают солнечную радиацию. При высокой степени концентрации солнечной радиации в приемнике может быть получен пар высокой температуры. Далее процесс

производства электроэнергии подобен процессу на тепловых электростанциях, за счет термодинамического цикла. Пар поступает в турбину, где происходит превращение тепловой энергии пара в механическую энергию вращения вала. С валом соединен ротор генератора, таким образом происходит трансформация механической энергии в электрическую. Практическая реализация солнечных энергетических станций башенного типа началась еще более 50 лет назад. В 1980 годах они получили наибольшее развитие в мире ввиду преимуществ по сравнению с другими солнечными тепловыми станциями. На сегодняшний день промышленная установка имеется в г. Севилья (Испания).

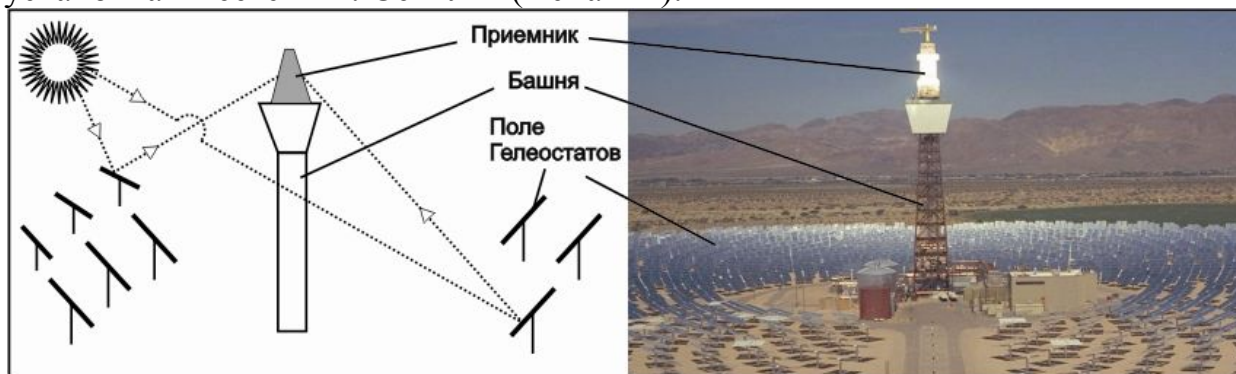


Рис. 3.23 Солнечная система башенного типа (солнечная башня)

*Система с плоскими параболическими концентраторами [Zar08].* Подобные системы уже хорошо развиты в США, где имеется ряд солнечных тепловых станций. Солнечная система состоит из плоских параболических концентраторов, последовательно соединенных друг с другом. В фокусе параболы расположен приемник (абсорбер), сделанный в виде трубопровода, по которому циркулирует теплоноситель – жидкая соль. Тепловая энергия от теплоносителя передается в другой замкнутый контур, где циркулирует вода. В этом контуре вода превращается в пар и по известному термодинамическому циклу – «тепло» превращается в механическую, а далее - в электрическую энергию.

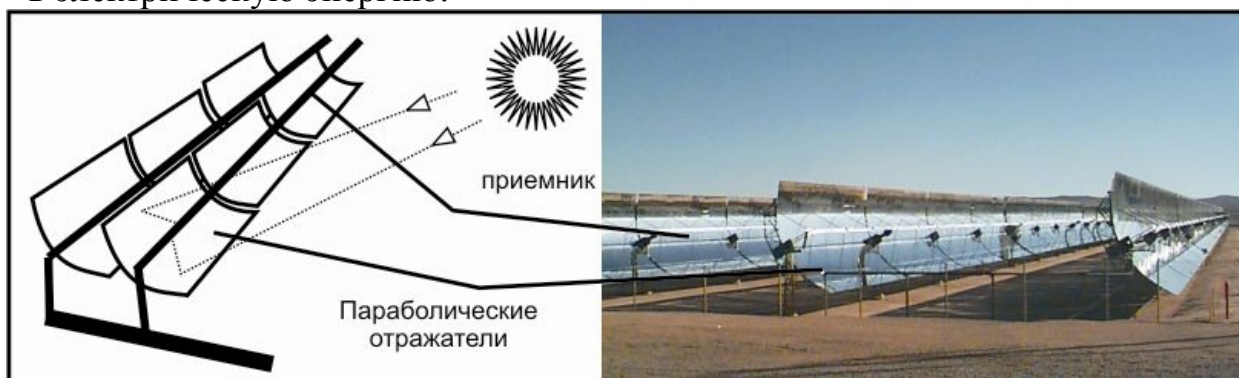


Рис. 3.24 Солнечная плоская параболическая система

*Параболический вогнутый концентратор с двигателем Стирлинга («Стирлинговая тарелка») [Zar08].*



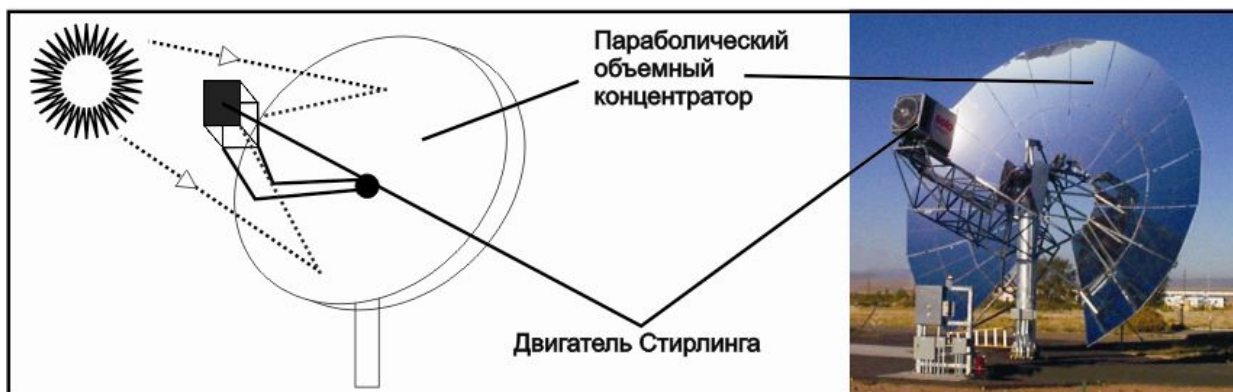


Рис.3.25 Параболическая система с двигателем Стирлинга

Отличие отражателя данной солнечной системы от системы с плоским параболическим преобразователем заключается в его форме. Отражатель данной системы напоминает по своей форме тарелку, поэтому с английского дословно переведенное названия системы «Стирлинговая тарелка». В фокусе параболоцилиндрического отражателя расположен двигатель Стирлинга. За счет термодинамического процесса (цикл Стирлинга) происходит преобразование тепловой энергии в механическую, затем - в электрическую.

Уникальная *солнечная печь* была построена еще в советское время в Уз. ССР общей мощностью 1 МВт (рис.3.26).



Рис.3.26 Солнечная печь в Узбекистане

С помощью плоских концентраторов в фокусе достигаются очень высокие температуры. Большая солнечная печь (БСП) представляет собой сложный оптико-механический комплекс с автоматической системой

управления, состоящей из гелиостатного поля и параболического концентратора, формирующих в фокальной зоне концентратора (технологическая башня) лучистый стационарный поток высокой плотности. Отражающая поверхность гелиостатного поля составляет 3022,5 м<sup>2</sup>, а концентратора - 1840 м<sup>2</sup>. Концентратор фокусирует отраженные гелиостатным полем солнечные лучи на фокальную зону диаметром 1 м, где создается высокоэнергичная область. Фокальная область расположена в технологической башне, где устанавливаются специальные приборы и оборудование, позволяющие исследовать физико-химические процессы, протекающие при высокотемпературном воздействии на вещества.

*Мультикомпонентная воздушно - водяная солнечная энергетическая установка (МВВСУ)* была разработана совместно силами Кассельского университета и КГТУ им. Раззакова 15, в рамках международного научного проекта. Прототип установки был внедрен на котельной «Ротор», которая находится в Бишкеке (КР). Установка способна преобразовывать энергию двух основных источников энергии: солнечная радиация и энтальпия окружающего воздуха. Подобное решение позволяет сезонной солнечной энергетической установке поддерживать работоспособность в ночное время. Установка состоит из трех основных компонентов: воздушный коллектор (1), теплообменник вода-воздух (4) и абсорбер (3) функционирует описанным ниже образом.

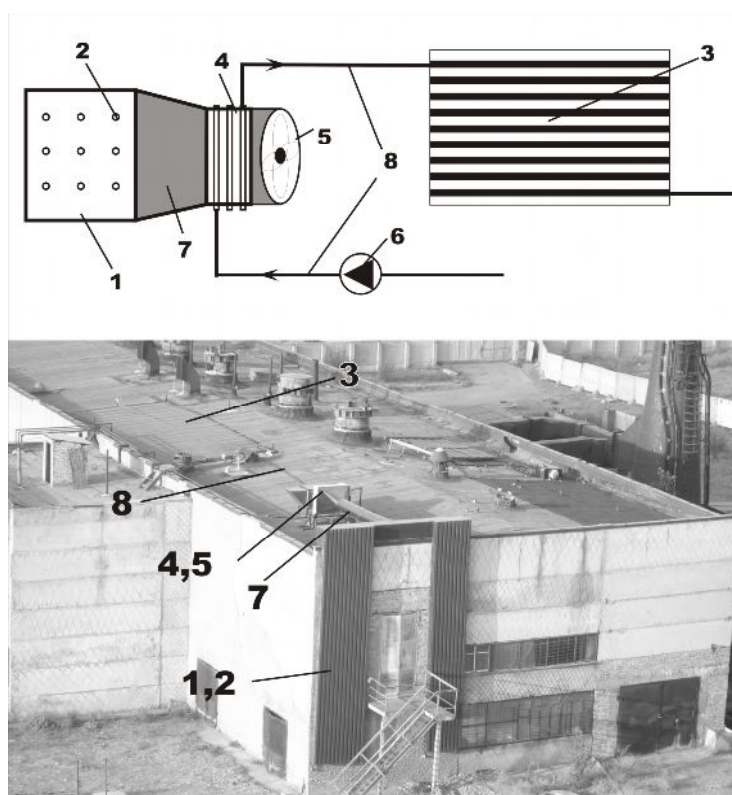


Рис.3.26 Экспериментальная МВВСУ на котельне «Джал», Бишкек, (Кыргызстан)

который, проходя по воздушному коллектору в принужденной конвекции забирает тепло коллектора.

Исходная вода из подземного или поверхностного водоисточника подается насосом (6) по трубопроводам (8) в теплообменник вода-воздух (4). Одновременно, под воздействием солнечной радиации, нагревается поверхность воздушного коллектора (1). Его конструкция представляет собой листы перфорированной стали с отверстиями (2), которая проста для монтажа как на фасадную часть здания, так и на крышу. С помощью вентилятора (5) через отверстия всасывает приграничный с воздушным коллектором теплый воздух,

При этом для электропитания вентилятора тратится мизерная энергия, в порядке 0.1 Вт на 1 м<sup>3</sup> прогоняемого воздуха. Теплый воздух, обдувая змеевик теплообменника, нагревает воду, протекающую в нем. Результаты эксперимента показали, что даже ночью в весенне-осенний период происходит нагрев воды за счет разницы температур окружающей среды и воды. Утилизируя энтальпию воздуха, установка получает дополнительную энергию из окружающей среды, что делает установку эффективной и работоспособной даже в ночное время. Из теплообменника вода далее поступает в абсорбер (3). За счет отсутствия стекла конвективная теплопередача между воздухом и абсорбером значительна. В ночное время можно получить до 0.1 кВт **с/м<sup>2</sup>** площади.

### 3.3 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач

1. Из каких основных компонентов состоит солнечная установка для горячего водоснабжения?
2. Какие виды солнечных коллекторов Вы знаете?
3. Назовите компоненты плоского солнечного коллектора.
4. Какие аккумуляторы тепловой энергии Вам известны?
5. Какие баки-аккумуляторы называют баками со «скрытой энергией»?
6. Какие зоны в водяном баке-аккумуляторе Вы знаете?
7. Что такое стратификация?
8. Термосифонная установка.
9. Солнечная система для горячего водоснабжения.
10. Комбинированная солнечная система.
11. Что такое фактор концентрации и его максимальное значение?
12. Какие типы солнечных концентрирующих систем Вы знаете?
13. Солнечная система башенного типа.
14. Линза Френеля.
15. Параболические установки с двигателем Стирлинга.

*Задача 1.* На рис.3.27 изображена характеристика КПД для плоского коллектора. Как изменится кривая КПД:

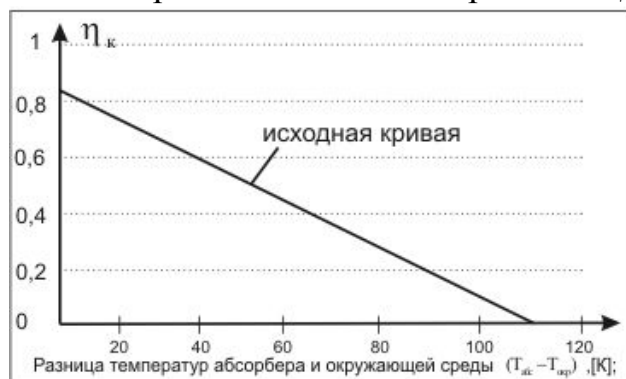


Рис. 3.27 Характеристика КПД коллектора

- а) если убрать светопрозрачное теплоизоляционное покрытие;
- б) если повысить коэффициент абсорбции солнечного коллектора;
- г) если уменьшить коэффициент тепловых потерь;
- д) если температура окружающей среды повысится?

*Решение:*

1. Характеристика КПД для солнечного коллектора является прямой:

$$\eta_k = \tau \cdot \alpha - U_{мен} \frac{(T_{абс} - T_{окр})}{G_{gl}} = \eta_0 - U_{мен} \frac{(T_{абс} - T_{окр})}{G_{gl}}.$$

2. Для построения кривых КПД достаточно определить 2 точки.

а) Коэффициент трансмиссии равен 0, это приводит к увеличению оптического КПД (продукт  $\tau \cdot \alpha$ ). Однако, отсутствие светопрозрачного покрытия приводит к увеличению коэффициента тепловых потерь ( $U_{мен}$ ), соответственно кривая КПД будет снижаться положе, чем первоначальная кривая.

б) Повышение коэффициента абсорбации солнечного абсорбера приводит к увеличению продукта  $\tau \cdot \alpha$ , однако на тепловые потери это никак не влияет. Кривая КПД будет проходить выше первоначальной кривой, параллельной.

г) Если уменьшить коэффициент тепловых потерь, то кривая будет убывать не резко. На оптический КПД это никак не повлияет.

д) Если температура окружающей среды повысится, то на кривую это никак не повлияет, потому что кривая строится как функция разницы температур абсорбера и окружающей среды. Поэтому кривая будет та же самая, что и в исходном случае.

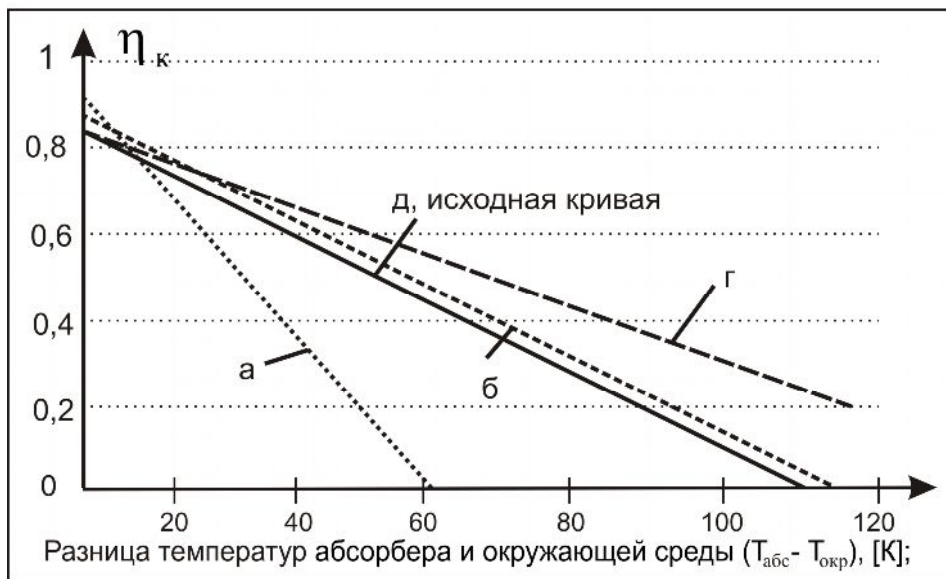


Рис.3.28 Изменение характеристики КПД коллектора

*Задача №2.* Определить коэффициент концентрации для линзы Френеля, если площадь концентратора ( $A_k$ ) равна 1,65 м<sup>2</sup>. А приемник выполнен в виде прямоугольника, габариты которого равны 1,5 x 0,1м (длина x ширина).

*Решение:*

Коэффициент концентрации определяется по формуле:



$$C = \frac{A_k}{A_{np}} = \frac{1,65}{1,5 \cdot 1} = 11.$$

*Задача №3.* На сколько процентов увеличится преобразованная плоским коллектором тепловая энергия, если нормальное светопрозрачное покрытие заменить на светопрозрачное покрытие с просветляющим слоем? Температура окружающей среды – 0 °С, приходящая на солнечный коллектор солнечная радиация 1000 Вт/м<sup>2</sup>, обобщенный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора принять равным 4 Вт/(м<sup>2</sup> · К), средняя температура абсорбера – 60 °С. Коэффициент абсорбции равен 0,95; коэффициенты трансмиссии светопрозрачного стекла и светопрозрачного покрытия с просветляющим слоем равны соответственно 0,9 и 0,96.

*Решение:*

1. Используя формулу для оценки коэффициента полезного действия

$$\eta_k = \tau \cdot \alpha - U_{мен} \frac{(T_{абс} - T_{окр})}{G_{gl}} = \eta_0 - U_{мен} \frac{(T_{абс} - T_{окр})}{G_{gl}},$$

оценим мощность преобразуемой тепловой энергии, Вт/м<sup>2</sup>:

$$\dot{Q}_{кол1} = \tau \cdot \alpha \cdot G_{gl} - U_{мен} \cdot (T_{абс} - T_{окр}) = 0,9 \cdot 0,95 \cdot 1000 - 4(60 - 0) = 855 - 240 = 615;$$

$$Q_{кол2} = \tau \cdot \alpha \cdot G_{gl} - U_{мен} \cdot (T_{абс} - T_{окр}) = 0,96 \cdot 0,95 \cdot 1000 - 4(60 - 0) = 912 - 240 = 672.$$

2. Определим, на сколько % повысится мощность преобразуемой тепловой энергии:

$$x = \frac{Q_{кол2} - Q_{кол1}}{Q_{кол1}} \cdot 100\% = \frac{672 - 615}{615} = 9,12\%.$$

## ГЛАВА 4. ПАССИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

### 4.1 Пассивные солнечные тепловые системы

*ПСТС – это непосредственно спроектированные элементы конструкций зданий, позволяющие оптимально использовать солнечную энергию.* Такие здания практически не требуют дополнительных затрат на эксплуатацию, автоматически воспринимают, преобразуют и аккумулируют солнечную энергию.

Пассивные солнечные тепловые системы позволяют сократить потребность энергии здания за счет увеличения потребления солнечной энергии и обеспечить комфортные условия в помещении.

Любые пассивные солнечные тепловые системы должны удовлетворять следующим требованиям:

1) значительные размеры окон на южной и практическое их отсутствие на северной сторонах (действительно для всех зданий северного полушария);

2) наличие затеняющих элементов (кровля крыши, выступы балконов) для предотвращения перегрева комнат здания в летней период;

3) компактность здания. Под компактностью здания понимается отношение площади поверхности теплообмена здания к отапливаемому объему. Чем компактней здание, тем меньше его тепловые потери;

4) достаточная инертность здания или термальная масса здания. Элементы конструкций зданий должны обладать достаточной теплоемкостью, так как именно они играют роль «аккумулятора энергии». Кроме того, термальная масса сглаживает колебания разницы температур окружающего воздуха и внутри комнаты;

5) хорошая теплоизоляция здания. Теплоизолированное здание уменьшает потребность в тепловой энергии зимой;

6) ориентация здания;

7) форма и материал крыши.

По сути, любое жилое строение представляет собой пассивную солнечную тепловую систему, однако некоторые более эффективны в использовании солнечной энергии. Такие понятия как «пассивный дом», «солнечный дом», «дом с низким энергопотреблением» напрямую характеризуют эффективность пассивных систем солнечного теплоснабжения.

### 4.2 Народные методы строительства. Традиционное жильё

Применение естественных или искусственных строительных материалов зависит не только от геологических, но и от климатических особенностей данного региона. Массивные плоские крыши с высокой термической емкостью характерны для условий пустынного климата рис.4.1.

Они поддерживаются деревянными балками, поверх которых настилаются валежник и пальмовые стволы и т.д. Например, легкие, компактные постройки кочевников - *юрты* собираются из шкур, ткани и

войлока; эскимосы используют лед и снег для строительства традиционного жилья - иглу.



Рис.4.1 Традиционное жилье в зависимости от геологических и климатических факторов

Или архитектура Среднего Востока, где все здания имеют внутренние дворы. Первые такие дома найдены в Уре (2000 лет до н.э.), они встречаются в Центральной Анатолии, Северной Африке и Месопотамии. Дома, расположенные по обе стороны улицы, имеют внутреннюю дверь, а задние фасады и боковые стены соседних домов примыкают друг к другу. Ширина улиц такова, что здесь даже в полдень в середине лета фасады не подвергаются действию прямой солнечной радиации. Внутренние дворы расположены выше фундамента – дома в основном двухэтажные с фундаментом и поднятым парапетом вокруг плоской крыши. Стены и крыша – массивные, что обеспечивает термическое запаздывание по времени. Тепло, накопленное внутренним двором днем, ночью уходит в пространство благодаря длинноволновому излучению. Из-за узких улиц, высокого расположения внутренних дворов и отсутствия отверстий во внешних стенах охлаждающее действие ветра невелико и создают его устройством специального ветросборника. Ветросборник представляет собой отверстие под крышей, под углом  $45^\circ$ , направленное навстречу преобладающему ветру. Попавший сюда воздух под давлением ветра проникает вниз через проходы шириной 900-1200 мм в находящуюся в подвале общую комнату, которая используется в жару после полудня. Поток ветра, так же как и конвективные токи воздуха, которые при соприкосновении с постоянно затененной массивной частью стены охлаждаются, заставляя прохладный воздух опускаться. Врытые в землю под полом кувшины с водой охлаждаются потоками воздуха за счет испарения воды, что способствует повышению влажности вентилируемого воздуха. В некоторых районах Среднего Востока вода из кувшинов пропускается через пористый слой из угля над резервуаром с водой, в результате чего происходит дальнейшее испарение.

От климата пустынь значительно отличается климат влажных тропиков. Тут традиционный дом легкий, сооружен из деревянных рам с крышами из пальмовых листьев. Дом поднят на сваях. Накопление тепла здесь стало бы разрушительным, т.к. прохладный бриз не успевает охладить

жилье. Стены затеняются широкими навесами крыш и посадкой деревьев вокруг дома. Тень у дома создает прохладное пространство с более низкой температурой поверхности почвы, что способствует охлаждению нижней поверхности пола за счет излучения и охлаждения воздуха под домом.

Третий пример постройки - эскимосское иглу, приспособленное для условий чрезвычайно холодного климата. Стены из сухого снега толщиной 500 мм обеспечивают хорошую теплоизоляцию. Форма идеальна для суровых условий, т.к. она обеспечивает минимум поверхности на единицу объема. С точки зрения аэродинамики, форма также превосходна, потому что оказывает ветру небольшое сопротивление, а отсюда и меньшие потери тепла. Точечный источник тепла способен нагревать иглу равномерно. Под действием тепла, внутренняя поверхность стен подтаивает и образуется корочка льда, которая уменьшает влияние пористой структуры снега и действует как отражающая поверхность. Внутренние поверхности купола и пола обычно покрываются шкурами, которые не только увеличивают теплоизоляцию, но и обеспечивают высокую температуру поверхности, поэтому потери тепла, излучаемого обитателями жилища, уменьшаются. Ограниченная вентиляция создается небольшим отверстием в середине купола, которое отрывается в сторону, противоположную господствующему ветру. Когда температура наружного воздуха поднимается, зимнее жилище разрушается и эскимосы переходят на другое место.

#### 4.3 Параметры и определения для пассивных домов

Для лучшего понимания характеристик не только для пассивных солнечных тепловых систем, но и зданий в целом вводится ряд определений, связанных с теплопередачей.

*Коэффициент  $U$  или  $k$  (Коэффициент теплопередачи),  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ,* описывает, какое количество энергии за одну секунду проходит через  $1 м^2$  поверхности при разнице температур передней и задней частей стены в  $1 °С$ . Для любой стены дома коэффициент  $U$  учитывает совокупность процессов теплоотдачи от воздуха стене, затем через стену путем теплопроводности и снова от стены в окружающий воздух,  $Вт/ м^2 \cdot К$  :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{воз}} + \sum \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_n}}, \quad (4.1)$$

где  $\alpha_{воз}$  - коэффициент теплоотдачи от воздуха помещения внутренней поверхности стены,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности стены в окружающий воздух,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $\delta_{cm}$  - толщина одной из прослоек (штукатурка, кирпич и т.д.) стены, м;  $\lambda_{cm}$  - коэффициент

теплопроводности для данной прослойки стены,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ . В табл. 4.1 приведены коэффициенты  $U$  для здания.

Табл.4.1

Значения коэффициентов  $U$  для различных элементов дома

Наименование	Толщина, (м)	$U, Вт/(м^2 \cdot К)$
Стена бетонная без утеплителя	0,1	4,42
	0,2	3,49
Стена отштукатуренная Кирпичная	0,054 (1\2 кирпича)	3,50
	0,108 (1 кирпич)	2,76
	0,162 (1,5 кирпича)	2,27
Деревянные стены (сруб)	0,1	1,15
	0,125	0,99
Бетонный пол без утеплителя	0,1	3,26
	0,2	2,67
Двойное остекление окна	Стекло – 4 мм, между 9 мм	3,3

При уменьшении значения коэффициента  $U$  для элементов здания уменьшаются потери тепла в зимнее время. Чем меньше общий коэффициент теплопередачи, тем лучше изолировано здание и тем меньше требуется тепловой энергии на обогрев. Из табл.4.1 видно, что толщина стены в 1 кирпич обладает в два раза меньшим коэффициентом  $U$ , чем бетонная стена такой же ширины.

Термическое сопротивление  $R, м^2 \cdot К / Вт$ , представляет собой величину, обратно пропорциональную коэффициенту  $U$ :

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{воз}} + \sum \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_n}. \quad (4.2)$$

Коэффициенты термического сопротивления для различных строительных материалов приведены в справочниках, СНиП, поэтому на практике приходится их вычислять только для нестандартных элементов или их сочетаний. Термическое сопротивление напрямую зависит от физических свойств материала.

Передача теплоты воздушной прослойке происходит за счет теплопроводности слоя воздуха, конвекции воздуха в прослойке и радиации стенок, ограничивающих воздушную прослойку. Поэтому коэффициент

$R_{воз} = \frac{1}{\alpha_{воз}}$  для воздушных прослоек является условной величиной,

учитывающей все виды передачи теплоты. Термическое сопротивление воздушных замкнутых прослоек определяют на основании опытных данных.

Коэффициент трансмиссии  $\tau$ . Стекло свойственно пропускать солнечную коротковолновую радиацию. Солнечная радиация, проходя через стекло, частично отражается, поглощается, но большая часть проходит

сквозь стекло. Доля солнечного излучения, которая прошла сквозь стекло, по отношению к приходящему солнечному излучению называется коэффициентом трансмиссии ( $\tau$ ). Коэффициент трансмиссии для солнечного излучения, перпендикулярно падающего на стекло, обозначим через  $\tau_{\perp}$ . На рис.4.2. [Еіс01] показана зависимость коэффициента трансмиссии для спектра волн, характеризующих солнечное излучение на земной поверхности и длинноволновое излучение. Солнечная радиация (интервал  $0,29 \div 2,5 \mu\text{м}$ ), пройдя через стекло, поглощается предметами в комнате, полом и стенами, которые в свою очередь нагреваются и испускают электромагнитные волны, однако уже в длинноволновом спектре. Для стекла длинноволновый спектр является непрозрачным, что приводит к парниковому эффекту. Парниковый эффект был подробно рассмотрен в первой главе.

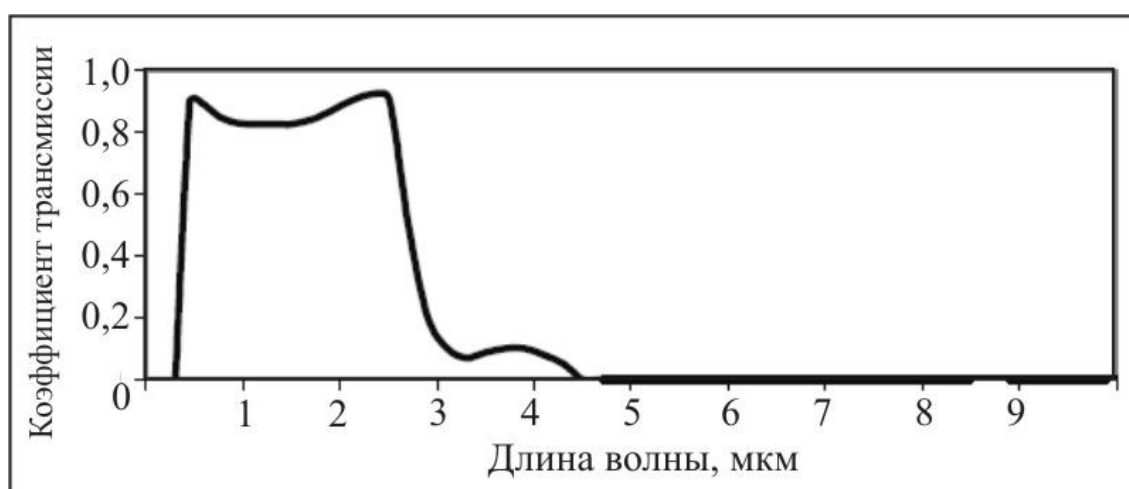


Рис.4.2 зависимость коэффициента трансмиссии от длины волны для одинарного остекления

*Коэффициент вторичной теплоотдачи  $q_i$ .* Вторичная теплоотдача показывает, какая часть абсорбированной глобальной солнечной радиации попадает внутрь здания благодаря длинноволновому излучению и конвекции. В пример, можно привести окно, которое частично пропускает (коэффициент трансмиссии), частично отражает и поглощает солнечное излучение. Абсорбированное солнечное излучение нагревает окно, которое затем испускает длинноволновое излучение в окружающую среду и частично в здание. Отношение количества энергии, которое попадет в здание за счет длинноволнового излучения и конвекции, к приходящей глобальной солнечной радиации и есть вторичная теплоотдача  $q_i$ .

*Коэффициент пропускания энергии  $g$*  показывает суммарную часть солнечной энергии, поступившей внутрь здания, то есть учитывает коэффициент трансмиссии, а также коэффициент вторичной теплоотдачи. Для прозрачных теплоизоляционных материалов, а также оконных стекол коэффициент пропускания энергии определяется по формуле:

$$g = \tau + q_i. \quad (4.3)$$

При проектировании энергосберегающих зданий, солнечных и пассивных домов правильная оценка коэффициента  $g$  поможет составить корректное уравнение теплового баланса для будущего здания

#### 4.4 Главные климатические факторы

Все три вида построек, выбранных в качестве примера в пункте 4.2 для экстремальных климатических условий, указывают на то, что приходящая солнечная радиация (суммарная), температура, ветер, влажность являются главными факторами, которые необходимо учитывать при проектировании зданий.

*Величина приходящая солнечная радиация* может быть получена из справочников, метеорологических станций или при помощи коммерческих компьютерных программ как, например, Meteonorm [Met60]. Оценка величины солнечной радиации необходима для правильного проектирования здания и рационального использования солнечной радиации. Очевидно, что максимальное солнечное излучение приходится на южный фасад здания, а минимальное - на его северную часть. Широкие окна на южном фасаде пропускают максимальное количество солнечной энергии внутрь здания, в то время как через окна на северной стороне в зимнее время происходят тепловые потери.

*Температура.* Температура окружающего воздуха учитывается при проектировании нагревательных и охлаждающих установок. Также необходимы и средние значения при вычислении расходов энергии. Суточные колебания нужны при расчете пиковых нагрузок внутри здания определенной массивности и для подбора оборудования.

Для проведения энергетических расчетов необходимо знать разницу между температурой наружного воздуха и внутренней температурой здания – ни экстремальные, ни средние значения здесь не дадут точной картины. Поэтому используется так называемый метод «градусо-дней». Он основан на том, что в неотапливаемом здании в среднем температура внутри помещения в результате случайного накопления тепла выше, чем снаружи. Разность температур составляет 3 °С. Для более массивных или более легких зданий она будет соответственно от 2 до 8 °С.

Таким образом, теоретически здание должно отапливаться только тогда, когда наружная температура понижается на величину большую, чем предусмотрено. Наружная температура, которая ниже внутренней на заданную величину, называется *базовой температурой*. Например, при разности температуры в 3 °С и внутренней запланированности 18 °С базовая температура будет 15 °С. Для дня когда средняя дневная температура на 1 °С ниже базовой температуры, разница в 1 °С может быть использована в расчетах потерь тепла и потребления энергии, и такой день дает 1 градус-день. Таким образом, по количеству градусо-дней можно судить о суровости климата данного региона.

«Демозона Бишкек» предложила климатические зоны и предоставила климатические данные, согласованные с гидромедцентром. Данные об отопительном сезоне, расчетной наружной и среднемесячной температурах получены из СНиП КР 23-02-00 “Строительная климатология”. Данные приведены в табл. 4.2 [Дем].

Табл.4.2

Значения градусо-дней для регионов

Месторасположение	15	18	20	21
	Градус-день (Degree-days)			
Usgen / Узген	1 931	2357	2 641	2 783
Osh / Ош	1 946	2366	2 646	2 786
Bishkek / Бишкек	2 220	2670	2 970	3 120
Cholpon-Ata / Чолпон-Ата	2 456	2670	3 346	3 524
Balykchy / Балыкчи	2 646	3186	3 546	3 726
Talas / Талас	2 713	3238	3 588	3 763
Karakol / Каракол	3 011	3572	3 946	4 133
Naryn / Нарын	4 032	4608	4 992	5 184

*Ветер.* Скорость ветра и его направление оказывают двухстороннее влияние на тепловой режим здания: они определяют сопротивление теплообмену на внешней поверхности здания, т.е. ее изолирующие свойства, влияют на кратность воздухообмена вследствие инфильтрации через отверстие и, следовательно, на общий тепловой баланс.

Для целей проектирования (расчетов инфильтрации, вентиляции и др.) полезно иметь **розу ветров**, где приводится направление и время, в течение которого скорость ветра превосходит определенную скорость. При наличии ветра разница давлений снаружи и внутри здания способствует созданию воздушных потоков, проникающих в здание через щели и отверстия (окна, двери) на наветренной стороне, и вытекающих из здания на подветренной стороне. Такой поток воздуха через здание может явиться причиной потери тепла (в летнее время, наоборот, притока тепла) и свести на нет влияние механической вентиляции, которая создается при постоянном давлении вентилятором и увлажнителями, имеющими специальные заборные отверстия. Если отверстия предусмотрены заранее, то эффективность системы вентиляции будут определяться положением отверстий относительно направления ветра, их величиной, а также расположением соседних стен.

*Влажность.* Влажность воздуха проявляется в виде физиологической и психологической реакции человека на тепловое ощущение. К тому же, влажность влияет на теплоизолирующие свойства пористых материалов. Влажность также влияет на конденсацию влаги на поверхность различных материалов, что может привести к сырости и, естественно, к образованию плесени. Много зависит от окружающего почвенного покрова. При наличии богатой растительности влажность воздуха является результатом испарений с почвы и растительности. Трава и другие растения вокруг здания будут



гарантировать более постоянную локальную влажность (также как и наличие открытой водной поверхности).

#### 4.5 Компоненты пассивных солнечных систем

Принимая во внимания требования к пассивным солнечным системам, можно выделить следующие компоненты: светопрозрачные теплоизоляционные компоненты (например, окна), абсорберы, «аккумуляторы энергии» (например стены здания), крыша кровли - как затеняющий компонент, предотвращающий перегрев в летнее время.

*Светопрозрачные теплоизоляционные компоненты.* Для пассивных солнечных систем окна, которые являются светопрозрачными теплоизолирующими покрытиями, играют огромную роль в энергообеспечении. Через окна поступает солнечная энергия, которая является не только источником света, но также источником тепла. Для обеспечения света расположение окон не играет значительной роли. Однако, как уже было отмечено выше, в энергетических целях окна целесообразно располагать на южном фасаде и минимизировать их количество на северном.

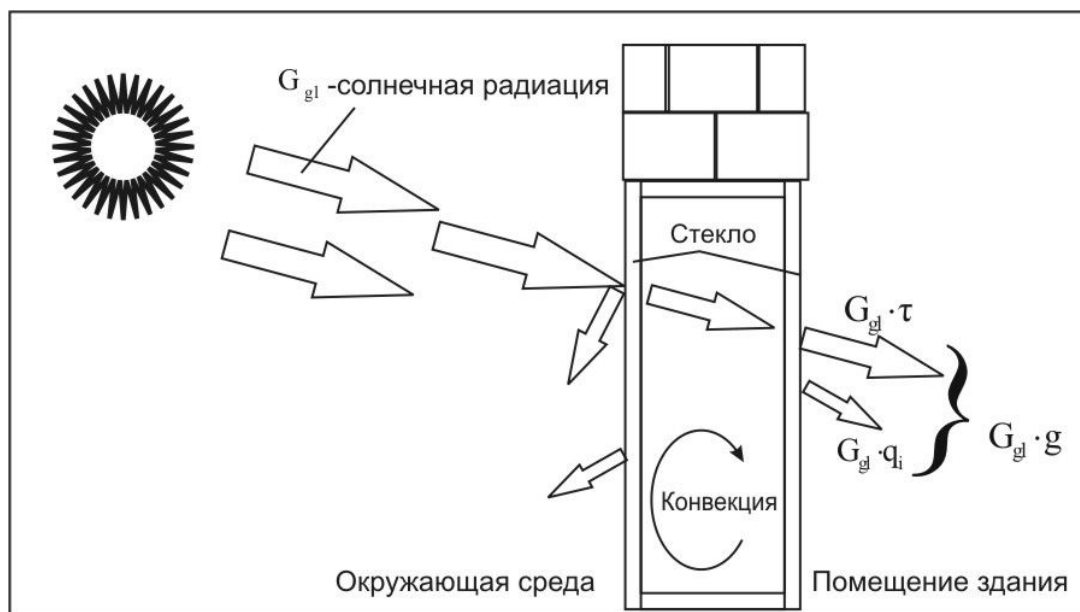


Рис.4.3 Энергия, поступающая через двойное остекление при глобальной радиации  $G_{gl}$

На рис. 4.3 схематически представлено общее количество мощности энергии, которое можно получить с помощью окон на южном фасаде. Глобальная солнечная радиация мощностью  $G_{gl}$ , Вт/м<sup>2</sup>, частично проходит через окно с двойным остеклением, частично отражается, частично поглощается окном. Поглощенная окном энергия выделяется в виде длинноволнового излучения, часть из которого в виде вторичной теплоотдачи поступает в комнату  $G_{gl} \cdot q_i$ . Можно отметить, что при проектировании зданий светопрозрачные теплоизоляции, а также окна

должны иметь максимальный коэффициент вторичной теплоотдачи, который характеризует количество энергии, поступающей внутрь здания, и одновременно минимальный коэффициент  $U$ , соответствующий минимальным тепловым потерям здания. Например, если заполнить пространство между остеклением инертным газом, который обладает незначительным коэффициентом теплопередачи, меньшим коэффициентом теплоемкости и повышенной, по сравнению с воздухом, вязкостью, то можно уменьшить коэффициент  $U$ , а соответственно и теплопотери.

В табл. 4.3 [Нас03] приведены примеры характеристик окон с двойным остеклением, пространство между которыми заполнено не воздухом, а инертным газом. Расстояние между остеклением называется оптимальным, потому что оно соответствует минимальному коэффициенту  $U$ .

Табл.4.3

Характеристики окон, заполненных инертными газами

Наименование газа	Воздух	Аргон	Криптон	SF <sub>6</sub>
Оптимальное расстояние между остеклением, мм	15,5	14,7	9,5	4,6
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$1,648 \cdot 10^{-2}$	$0,9 \cdot 10^{-2}$	$1,275 \cdot 10^{-2}$
Плотность газа, кг/м <sup>3</sup>	1,23	1,699	3,56	6,36
Динамическая вязкость газа, Па с	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$2,164 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-5}$	$1,459 \cdot 10^{-5}$
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	1007	519	345	614

С развитием науки и техники появляются и другие технологии, обеспечивающие светопрозрачным покрытиям минимальный коэффициент  $U$ . В табл.4.4 [Pla95] представлены некоторые примеры окон и их коэффициенты теплопередачи ( $U$ ) и коэффициенты пропускания энергии ( $g$ ). Из приведенных данных можно сделать вывод, что с уменьшением коэффициента  $U$  незначительно падает и коэффициент пропускания энергии  $g$ . Окно с двойным остеклением, толщина стекол которых 4 мм, а межстекольное пространство - 16 мм, имеет параметры  $g=0,65$  и  $U=3,00$ , Вт/(м<sup>2</sup>К).

Табл.4.4

Значение  $g$ ,  $U$  для различных окон

Наименование	Коэффициент $g$	Коэффициент $U$ , Вт/м <sup>2</sup> К
Окно с двойным остеклением (4+16+4, воздух)	0,65	3,00
Окно с двойным остеклением (4+16+4, аргон)	0,6	1,3
Окно с двойным остеклением (4+14+4, ксенон)	0,58	0,9
Окно с тройным остеклением	0,44	0,8

заполненные аргоном		
Окно с тройным остеклением заполненные криптоном	0,44	0,7
Окно с тройным остеклением заполненные ксеноном	0,42	0,4

*Затеняющие компоненты.* Учитывая диаграмму солнцестояния для данной местности, можно без особенных трудностей предусмотреть перегрев здания в летнее время. Для затенения здания от солнечного излучения в летнее время можно использовать правильно спроектированную кровлю крыши, выступы балконов для многоэтажных зданий. Такие затеняющие компоненты отличаются простотой и долговечностью, являясь одновременно элементами самих зданий. На рис.4.4 показан схематически принцип функционирования таких систем. Максимальная высота солнцестояния для города Бишкек наблюдается 21 июня и составляет порядка  $\alpha_s = 71^\circ$ , а минимум - 21 декабря  $\alpha_s = 24^\circ$ . С учетом разницы высоты солнцестояния, можно очень просто избежать перегрева комнат, продлив кровлю крыши.

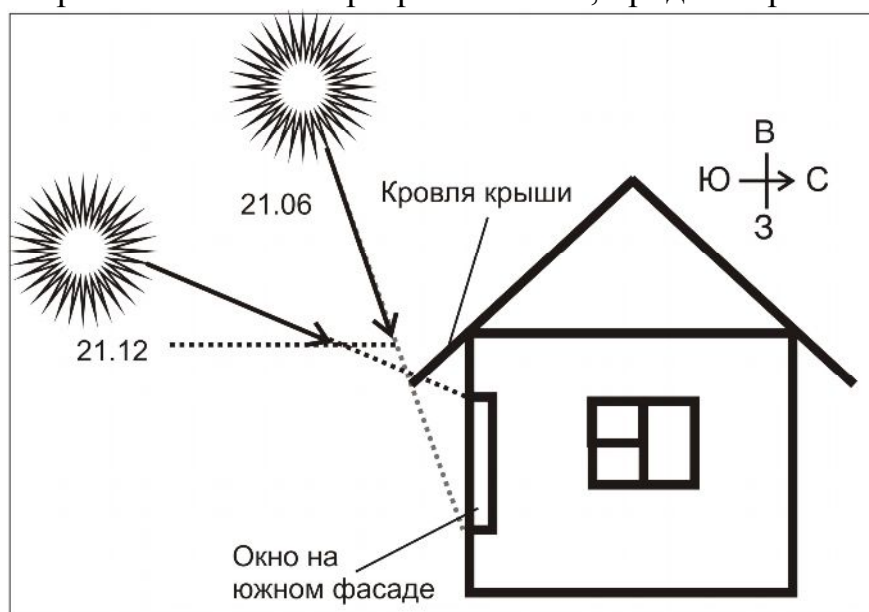


Рис.4.4 Затеняющие компоненты пассивных солнечных систем (на примере Бишкека)

К пассивному проектированию можно также отнести растительность, высаженную вокруг здания. Конечно, растительность не является компонентами зданий, однако она относится к компонентам пассивного проектирования. Известный биологический цикл у растительности, например, у деревьев: осенью листья начинают желтеть и опадать. Таким образом, зимой некоторые деревья остаются совсем «голыми», состоящими лишь из веток. Весной же начинают распускаться почки, затем вырастают листья, создающие в дневное время напротив падающей солнечной радиации прохладную тень. Оптимально высаженное дерево перед южным фасадом здания может обеспечить сохранность от перегрева в летнее время,

обеспечивая прохладу, и одновременно использование солнечной радиации в зимнее время как дополнительной энергии.

*Абсорберы и накопители энергии.* Если в качестве абсорберов и накопителей энергии в активных солнечных тепловых системах речь шла о специальных технологических компонентах как коллектор или бак-аккумулятор, то в пассивных солнечных системах эту функцию играют сами конструктивные части здания. В *системах с прямым теплопоступлением* абсорбером являются все поверхности предметов, попадающие под солнечное излучение. Стены, пол и сами предметы комнаты являются накопителями энергии или аккумуляторами. Для оценки емкости аккумуляторов пассивных систем, например, стены, применяется известная ранее формула которая учитывает плотность вещества стены, объем стены и теплоемкость.

#### 4.6 Системы пассивного отопления

В зависимости от расположения компонентов различают следующие виды систем пассивного отопления: системы с прямым теплопоступлением, системы с косвенным теплопоступлением.

В *системах с прямым теплопоступлением* солнечные лучи проникают в отапливаемые помещения через оконные проемы и нагревает строительные конструкции, которые становятся приемниками и аккумуляторами тепла [Кер94]. Для таких систем характерно, что температура комнаты и поверхности предметов изменяются практически одновременно с изменением солнечной радиации, поступающей в помещение. Подобные системы особенно полезны, когда цикл потребности тепла совпадает с циклом изменения приходящей солнечной радиацией. Например, подобные системы могут быть применены для офисов, где днем имеется потребность для отопления, а ночью нет.

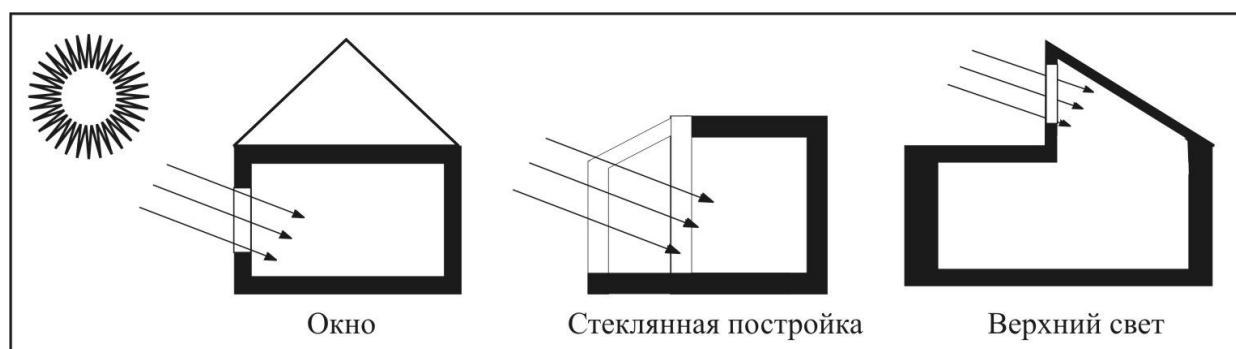


Рис.4.5 Варианты систем с прямым теплопоступлением

В *системах с косвенным теплопоступлением* поток солнечной радиации непосредственно не проникает в помещение, а поглощается теплоприемниками (защищенными светопрозрачными ограждениями), совмещенными с наружными ограждающими конструкциями, которые

являются, как правило, аккумуляторами тепла [Кер94]. Накопленное тепло в аккумуляторах (конструкции здания) передается воздуху помещения. Преимуществами таких систем является простота, а так же инертность системы. В дневное время под воздействием солнечной радиации происходит нагрев строительных конструкций, накопленное тепло которых расходуется в ночное время. В отличие от систем с прямым теплопоступлением температура комнаты здесь резко не меняется в зависимости от изменения приходящей глобальной радиации. Недостатками таких систем является более высокие тепловые потери в окружающую среду по сравнению с системами прямого теплопоступления. По-другому подобные системы нередко называют *солнечными стенами*, так как в основном именно стены являются аккумуляторами тепловой энергии.

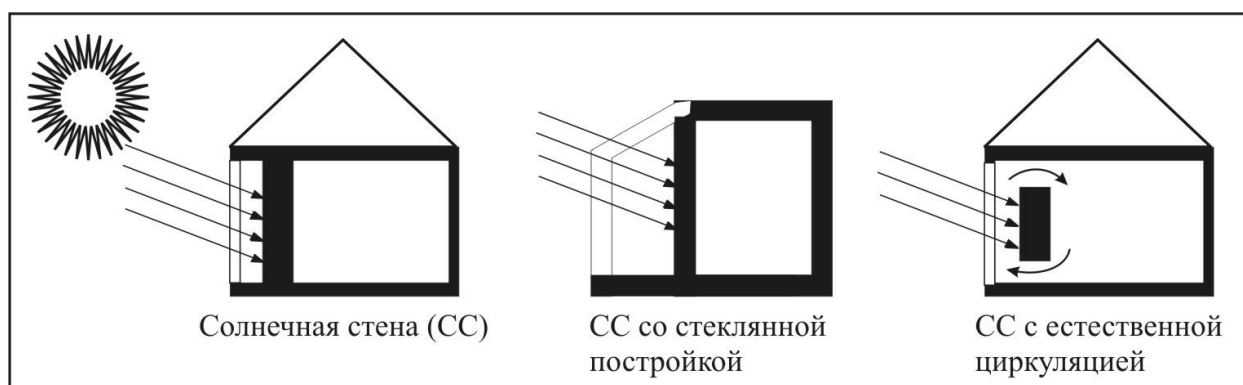


Рис.4.6 Варианты систем с косвенным теплопоступлением

Новыми разработками в области эффективного строительства относятся так же *светопрозрачная теплоизоляция* (transparent thermal insulation). Если в качестве теплоизоляционных материалов привычнее видеть минеральную вату, изолвер, пенопласт, которые обладают низким коэффициентом теплопроводности и являются непрозрачными для солнечного излучения, то светопрозрачная теплоизоляция имеет ряд преимуществ. Светопрозрачная изоляция пропускает солнечное излучение и одновременно обладает низким коэффициентом теплопередачи. Подобная теплоизоляция дает возможность дополнительно пропускать солнечную энергию, тем самым обеспечивая приток энергии. Светопрозрачная изоляция может стать хорошим средством по утеплению уже существующих зданий.

*Смешанные системы* [Кер94]. У смешанных солнечных систем некоторые компоненты не являются конструктивной частью здания (например, вентилятор - для создания циркуляции воздуха). Иногда становится трудно классифицировать такие системы, которые можно отнести и к активным солнечным системам. Подобные системы характеризуются тем, что тепло накапливается на конструктивной части здания, которая изолирована от помещения. Солнечное тепло через специальные каналы переносится воздухом в накопитель, который может быть или составной конструкцией здания, или отдельным компонентом.

Данные системы применяются для большего сдвига фаз между тепловой потребностью и приходящей солнечной радиацией. Основным преимуществом данных систем является возможность их регулирования. Ввиду теплоизоляции между абсорбером и внутренним помещением происходит уменьшение тепловых потерь в ночное время. Недостатками таких систем являются их непростая конструкция, чувствительность к дефектам (например, неплотность).

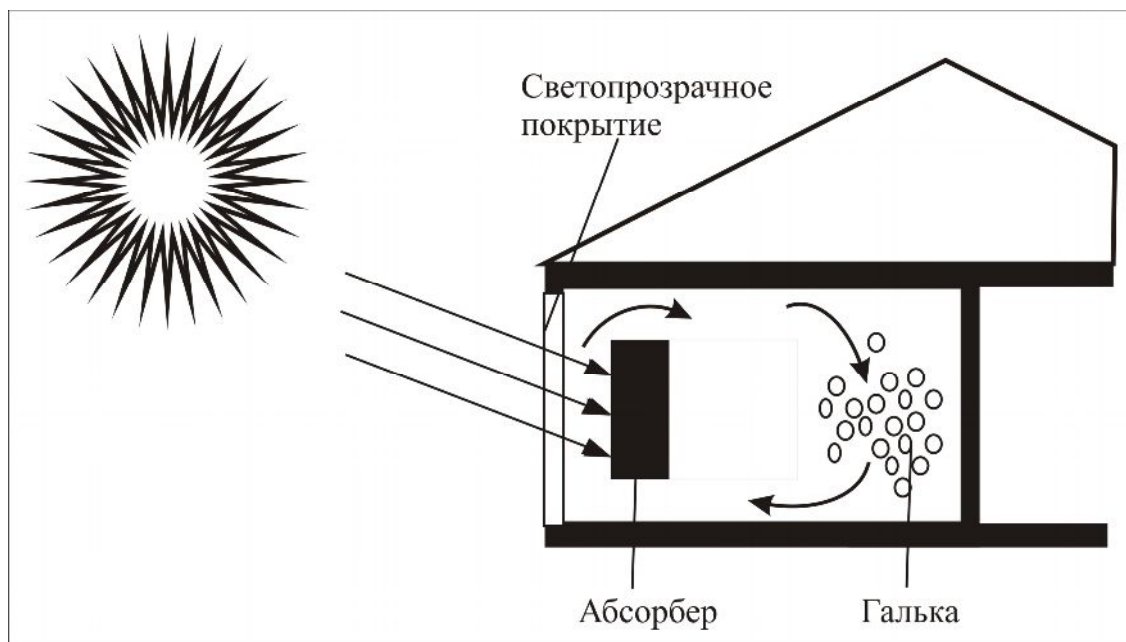


Рис.4.7 Смешанная солнечная система

#### 4.7 Примеры пассивных солнечных систем

Имеется целый ряд примеров по использованию пассивных солнечных систем. Далее будут рассмотрены только некоторые из них.

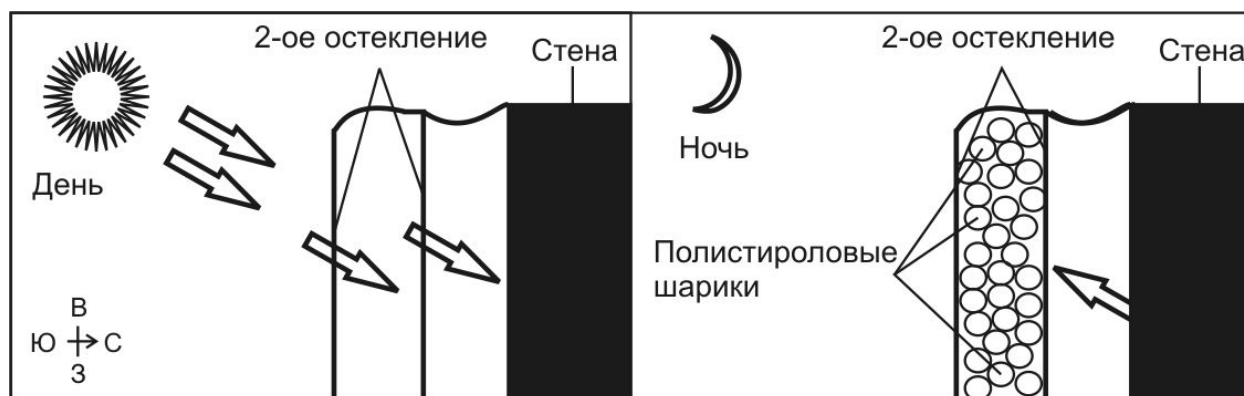


Рис. 4.8 Система «Бидуолл»

Система «Бидуолл» (рис.4.8.) [Аве88]. Ограждающая конструкция здания системы «Бидуолл» состоит из двух оконных стекол с полым

пространством между ними, которое заполняют полистироловыми шариками. В солнечные дни гранулы убирают из полости, чтобы обеспечить доступ солнечной радиации. Солнечная радиация, проникая через остекление, нагревает стену, играющую роль аккумулятора энергии. В ночное время заполненная гранулами полость является теплоизоляцией, что снижает теплопотери из здания.

*Система Скайлид* представляет собой кровельный фонарь с расположенными под ним тремя центрально сбалансированными заслонками (жалюзи). Центральная заслонка оборудована с каждой стороны черной трубкой с фреоновой жидкостью, расположенной таким образом, что при прохождении прямой солнечной радиации через кровельный фонарь и попадании на лопасти фреон расширяется, переходит в другую трубку и выводит из равновесия лопасти, которые открываются и закрываются. Лопасты снабжены изоляцией, поэтому потери тепла из здания замедляются.

*Система «Стена Тромба- Мишеля»* (рис.4.9.) [Мак81] состоит из массивной бетонной стены, окрашенной снаружи в черный цвет, и остекленного экрана, отстоящего от стены на 50 мм. Бетонная стена изнутри и все элементы ограждающей конструкции изолированы. Стена, которая одновременно является коллектором и аккумулятором тепла, ориентирована на юг. Солнечная радиация проникает сквозь стекло, поглощается покрытием и нагревает стену. Нагретая стена испускает длинноволновое излучение, которое задерживается стеклом, благодаря чему воздух в зазоре между стеной и остеклением нагревается. Проходы в верхней и нижней частях стены дают возможность нагретому воздуху поступать в комнату на уровне потолка, а холодному воздуху уходить из помещения на уровне пола. Охлаждение в летний период осуществляется с помощью клапанов, расположенных в верхней части стены, через которые нагретый воздух выбрасывается в атмосферу, и клапана, находящегося в задней части здания и обеспечивающего поступление холодного воздуха. Толщина стен составляет обычно от 300 до 400 мм. Внутри стен можно разместить другие аккумулирующие системы, такие как водяные баки или химические аккумуляторы, действующие на основе фазовых переходов. Прототипы этих домов построены в Одейо.

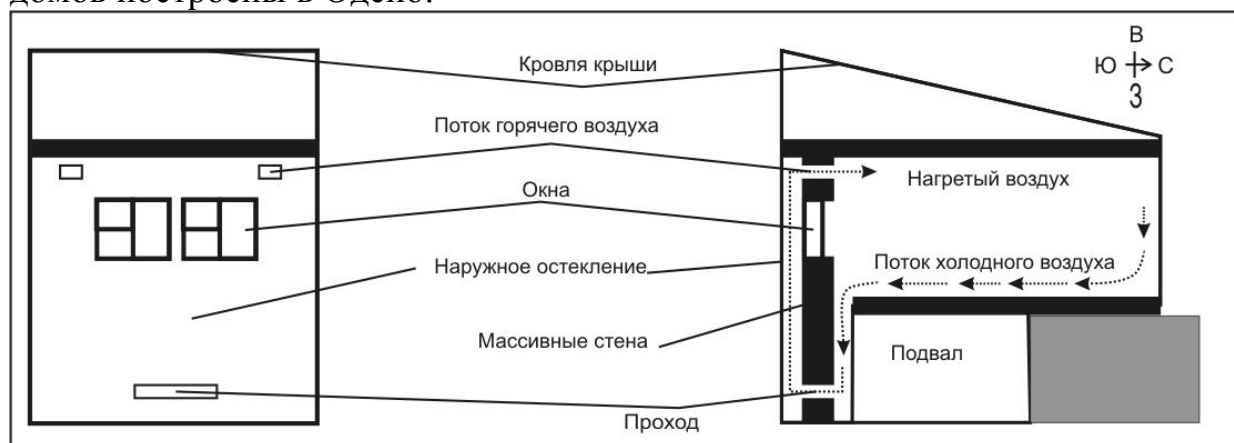


Рис.4.9 Система «Стена Тромба-Мишеля»

*Система «Марсельская стена».* Здесь также используется массивная стена. Наружные жалюзи можно открыть, что бы дать доступ прямому солнечному излучению, в ночное время жалюзи закрывают, чтобы снизить скорость утечки тепла (тепло, поглощенное стеной, ночью отдается зданию). Летом в течение дня жалюзи могут закрываться для защиты от притока солнечного тепла. Ночью в летнее время при открытых жалюзи поглощенное днем тепло через стену выходит наружу. Недостаток в том, что жалюзи нужно постоянно регулировать по мере изменения положения солнца на небосводе.

*Система «Скайтерм хауз».* Здесь используются мешки с водой на кровле здания. В зимнее время солнцезащитные экраны над мешками убирают, и мешки нагреваются солнцем. Ночью и в зимнее время солнцезащитные экраны снижают скорость утечки тепла. Летом - обратный процесс.

*Система Альтенкирха* - восточные и западные пустотелые стены дома, заполненные сорбирующим материалом, непрепятствующие вертикальному потоку воздуха между наружной и внутренней оболочками стены. В верхней и нижней частях каждой стены находится регулирующий клапан, который можно настроить на пропускание воздуха через помещение как с востока на запад, так и с запада на восток. В верхней части каждой стены расположены испарительные охладители. Утром солнце нагревает восточную стену и вызывает подъем воздуха внутри нее. При помощи клапанов поток воздуха направлен через помещение с запада на восток. Поднимающийся нагретый воздух в восточной стене вызывает движение воздуха с западной стороны дома через помещение. Сорбирующий материал высушивает наружный воздух до того, как он проходит через испарительный охладитель. Охлажденный воздух опускается к полу помещения и затем вытягивается через нагретую восточную стену, в это время удаляется влага, поглощенная сорбирующим материалом в восточной стене за предыдущим. Во второй половине дня регулирующие клапаны настраивают для пропускания потока воздуха через помещение с востока на запад.

*Система «пассивного» солнечного отопления А. Моргана.* Разработанная Морганом система была внедрена на базе школы в Великобритании, где он использовал светопрозрачную теплоизоляцию (стекло) и инертность южного фасада. Система пассивного теплоснабжения представлена на рис. 4.10 [Аве88]. Двухэтажная школа практически полностью отапливалась за счет приходящей солнечной энергии.



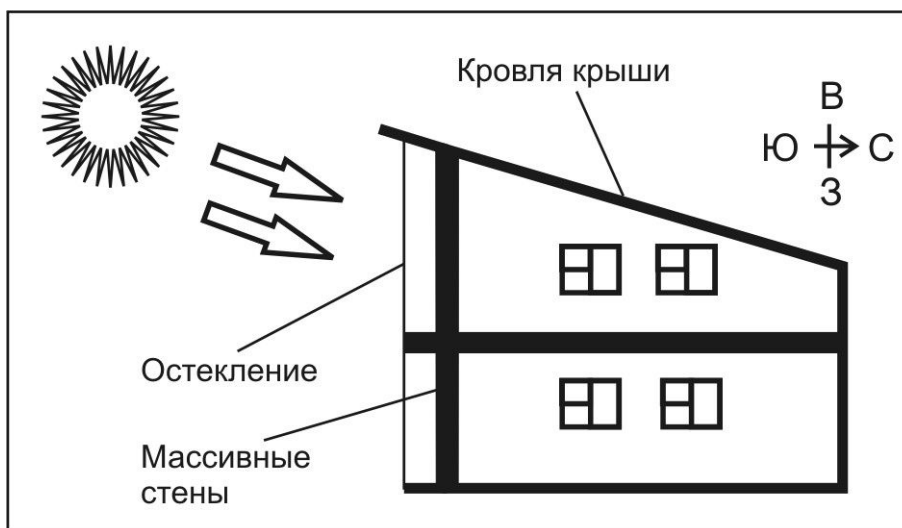


Рис.4.10 Система солнечного отопления Моргана

#### 4.8 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач

1. Пассивные системы теплоснабжения.
2. Назовите элементы пассивного теплоснабжения.
3. Что показывает значение  $U$  или  $k$ ?
4. Что такое коэффициент пропускания энергии?
5. Какие требования предъявляются к окнам?
6. Традиционные методы строительства.
7. Какие климатические факторы необходимо учитывать при проектировании зданий?
8. Почему желательно окна располагать на южном, а не северном фасаде?
9. Для чего необходимо затенение зданий?
10. Какие пассивные системы Вам известны?
11. Что такое система с прямым теплопоступлением?
12. Что такое система с косвенным поступлением?
13. Какие примеры пассивного теплоснабжения Вам известны?
14. Как работает стена Тромба-Мишеля?
15. Какой принцип используется в конструкции дом Моргана?

*Задача №1.* Определите запасенную энергию в стене, которая является накопителем энергии для здания. Толщина бетонной стены 30 см, плотность стены  $2100 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость  $1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ , площадь стены  $6 \text{ м}^2$ . Запасенную энергию рассчитать для изменения температуры стены в  $5 \text{ К}$ .

*Решение:*

1. Количество энергии определяется по известной формуле, учитывающей удельную теплоемкость, объем и разницу температур для стены, кДж:

$$Q_{cm} = m_{cm} \cdot c_{cm} \cdot \Delta T = \rho_{cm} \cdot d_{cm} \cdot A_{cm} \cdot c_{cm} \cdot \Delta T = 2100 \cdot 0,3 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 5 = 18900$$

2. Масса стены определяется по следующей формуле, кг:

$$m_{cm} = \rho_{cm} \cdot d_{cm} \cdot A_{cm} = 2100 \cdot 0,3 \cdot 6 = 3780$$

3. Переведем кДж в кВт час:

$$Q_{cm1} = Q_{cm} / 3600 = 18900 / 3600 = 5,25 \text{ кВт.}$$

*Задача №2.* Определите теплопроизводительность солнечной стены и ее коэффициент полезного действия. Площадь пластины, воспринимающей солнечную радиацию,  $A=2,7 \text{ м}^2$ . Пластина изолирована двойным остеклением. Перенос тепла осуществляется за счет естественной циркуляции через круглые отверстия диаметром 0,2 м, расположенные в стене. Мощность приходящей солнечной радиации на вертикальную поверхность равна  $853 \text{ ккал/м}^2$ . Радиация, поглощаемая пластиной, равна  $640 \text{ ккал/м}^2$ . Теплоемкость и плотность воздуха принять соответственно равными  $0,187 \text{ (ккал/(кг}\cdot\text{°C))}$  и  $1,128 \text{ (кг/м}^3)$ . температура внутри здания  $+18 \text{ °C}$ , при температуре окружающей среды (наружного воздуха)  $-12 \text{ °C}$ .

*Решение:*

1. Схематически изобразим солнечную стену:

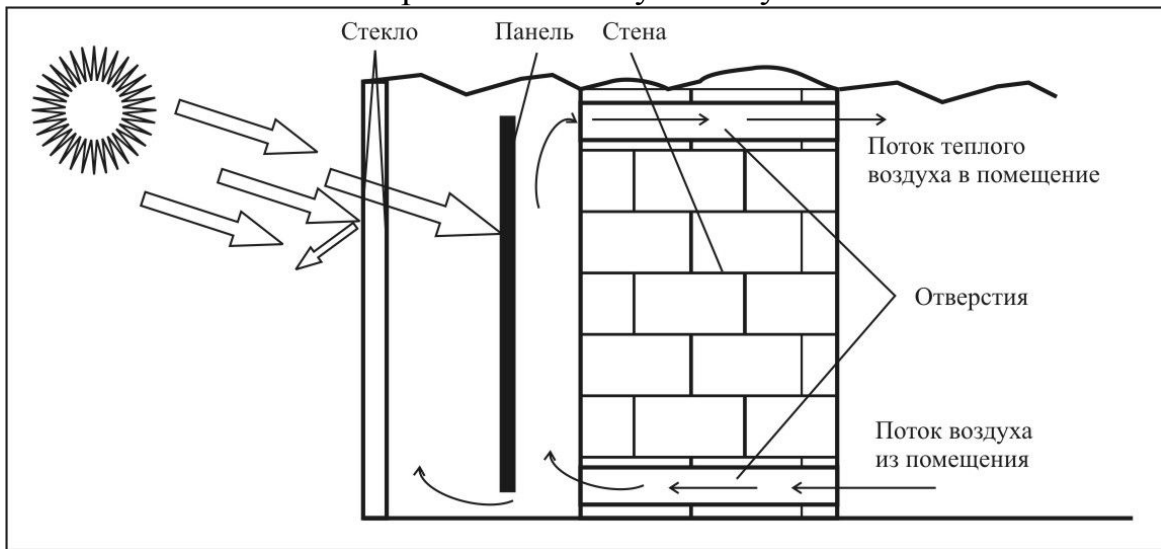


Рис.4.11 Солнечная стена

2. Определим температуру воздуха на выходе, которая вычисляется с помощью эмпирической формулы, полученной для таких систем,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$t_{вых} = 1,262 \cdot t_{ex} + 0,031 \cdot q_c + 0,163 \cdot t_{np} = 1,262 \cdot 18 + 0,031 \cdot 640 + 0,163 \cdot (-12) = 41,2.$$

3. Скорость переноса тепла в каналах вычисляется опять же с помощью формулы, полученной для таких систем, м/с:

$$v_{ml} = 0,372 + 0,0165(t_{вых} - t_{ex}) = 0,372 + 0,0165(41,2 - 18) = 0,755.$$

4. Определим расход воздуха, используемого в качестве теплоносителя, кг/ч:

$$V_{воз} = v_{ml} \cdot \rho_{воз} \cdot A_{ст} \cdot 3600 = 0,755 \cdot 1,128 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 3600 = 96,26.$$

5. Часовая производительность солнечной стены вычисляется по следующей формуле, ккал/ч:

$$Q_{сис} = V_{воз} \cdot \rho_{воз} \cdot c_p (t_{вых} - t_{ex}) = 96,26 \cdot 1,128 \cdot 0,187 \cdot (41,2 - 18) = 471,06.$$

6. Вычислим коэффициент полезного действия солнечной стены:

$$\eta_{cm} = \frac{Q_{сис}}{G_{над} \cdot A_{cm}} = \frac{471}{853 \cdot 2,7} = 0,2.$$

*Задача №3.* Определите коэффициент пропускания энергии  $g$  для двойного остекления. Коэффициент трансмиссии стекла принять равным 0,6, коэффициент вторичной теплоотдачи - 0,12.

*Решение:*

1. Коэффициент пропускания энергии определяется по формуле:

$$g = \tau + q_i = 0,55 + 0,08 = 0,63.$$

## ГЛАВА 5. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ФОТОВОЛЬТАИК)

### 5.1 Фотоэффект

Термин фотовольтаик состоит из двух слов «фото» (от греч. свет) и «вольт» (Граф Вольт 1745-1827, итальянский физик) - единица измерения напряжения в электротехнике. Анализируя термин фотовольтаик, можно сказать - это преобразование света в электричество.

История развития фотовольтаика начинается в далеком 1839 году, когда впервые был обнаружен *фотоэффект*. Но только через 100 лет началось стремительное развитие полупроводников. В 1954 был создан первый кремневый полупроводниковый фотодиод в США, КПД которого был около 5%. С того времени КПД солнечного элемента постоянно повышается. КПД кремневого солнечного элемента сегодня в лабораторных условиях достигает 20%. Кроме кремния были исследованы и другие полупроводниковые материалы, и некоторые уже имеются на рынке. Однако, в связи с дороговизной солнечных элементов и низким КПД, стоимость выработки электричества остается на достаточно высоком уровне. В связи с этим основное использование фотовольтаика наблюдается в районах, отдаленных от линий электропередачи, для автономных потребителей.

*Фотоэффект* – это физический процесс, благодаря которому солнечная панель преобразует проходящую солнечную радиацию в электричество. Различают внешний и внутренний фотоэффект. Под внешним фотоэффектом (фотоэлектрическая эмиссия) понимается испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Внутренний фотоэффект – это перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящие под действием электромагнитного излучения. В фотовольтаике используется внутренний фотоэффект.

Согласно теории Бора, атом состоит из положительно заряженных протонов и нейтронов и которые вращаются вокруг ядра на определенных энергетических уровнях (орбиталь) отрицательно заряженные электроны. Для того, чтобы электрон привести на более высокий уровень, требуется приложить энергию. В качестве такой энергии можно использовать солнечное излучение, которое представляет собой электромагнитное излучение (энергия фотонов). Энергия одного фотона, с длиной волны  $\lambda$  :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot \nu, \quad (5.1)$$

где  $\lambda$  - длина волны, м;  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  скорость света в вакууме, м/с;  $h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$  постоянная Планка, Дж·с;  $\nu$  - частота волны, 1/с. Чем меньше длина волны фотона, тем больше величина запасенной в нем энергии.

Если взять, к примеру, простейший атом водорода, то для перевода электрона с первого энергетического уровня на второй необходимо затратить

порядка 13,59 эВ энергии. Фотоны с длиной волны меньше,  $\lambda = 90\text{нм}$ , что соответствует рентгеновскому излучению, способны поднять электрон и освободить его от влияния ядра. Освобождение электронов от ядра (или испускание электронов) с помощью энергии фотона называется *внешним фотоэффектом*.

Однако, технология фотовольтаика ориентирована на использование солнечного излучения, спектр волн которого приходится на видимое, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, которые обладают меньшей энергией, потому что длина волны приходится на спектр между  $0,29 \div 2,5\text{мкм}$ . Поэтому в фотовольтаике рассматривают внутренний фотоэффект.

## 5.2 Зонная теория

Согласно зонной теории, зоны, начиная с верхней, наполнены электронами. Самая верхняя зона, полностью заполненная электронами, называется *валентной зоной*. Следующая за ней зона может быть частично заполненной или полностью пустой и называется *зоной проводимости*. Между валентной зоной и зоной проводимости находится так называемая *запрещенная зона*. В зависимости от расположения зон, в частности от ширины запрещенной зоны, что напрямую влияет на проводимость, твердые тела делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики (рис.5.1) [Sch93].

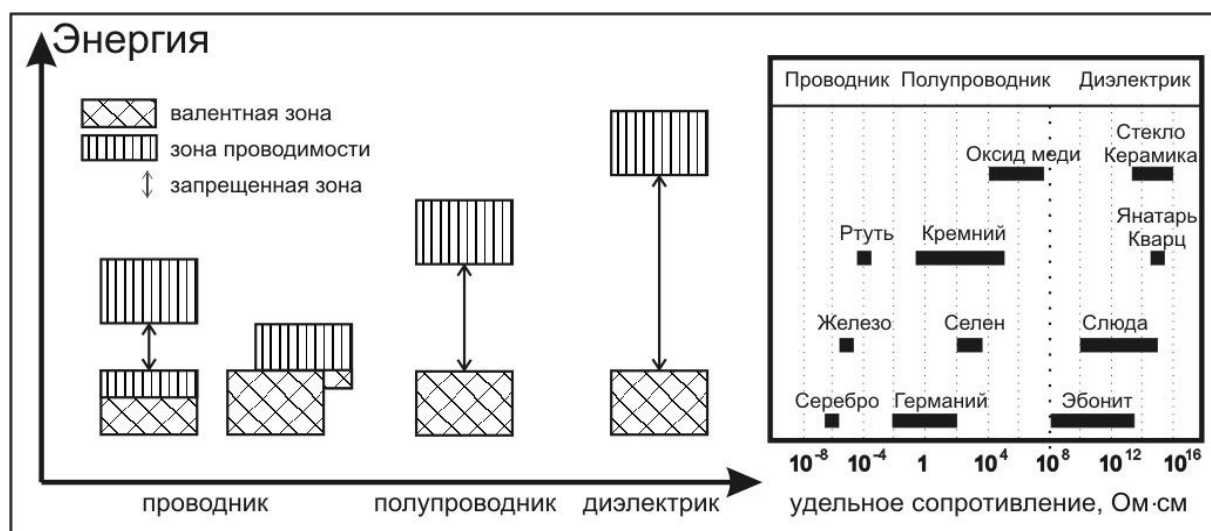


Рис.5.1 Удельное сопротивление, и зоны проводников, полупроводников и диэлектриков

*Проводники.* В проводниках, например, в металлах или их сплавах, зона проводимости не полностью заполнена электронами или валентная зона пересекается с зоной проводимости. Электрическая проводимость осуществляется благодаря свободным электронам, которые расположены в кристаллической решетке. Поэтому проводники обладают низким удельным

сопротивлением. Удельное сопротивление увеличивается с повышением температуры проводников.

*Диэлектрики.* Диэлектрики, например керамика, резина, имеют полностью заполненную электронами валентную зону, широкую запрещенную зону ( $E_g > 3$  эВ) и пустую зону проводимости. Как правило, диэлектрики практически не имеют свободных электронов. При повышении температуры некоторые электроны могут преодолеть запрещенную зону, благодаря чему появляется небольшая проводимость.

*Полупроводники.* Полупроводники (кремний, германий, арсенид-галлия и др.) имеют незначительную ширину запрещенной зоны ( $0,1 \text{ эВ} < E_g < 3$  эВ). При низких температурах химически чистые полупроводники являются диэлектриками. При подводе энергии (большей чем ширина запрещенной зоны  $E_g$ , рис. 5.2) электроны могут преодолеть запрещенную зону и попасть в зону проводимости, а если энергия меньше ширины запрещенной зоны, то энергия фотона приводит к нагреву материала. При высоких температурах полупроводники становятся проводниками, и в отличие от проводников проводимость полупроводников падает с повышением температуры.

### 5.3 Собственная и примесная проводимость полупроводников

Если в полупроводник с собственной проводимостью ввести определенное число примесных ионов, то в проводнике возникает примесная проводимость.

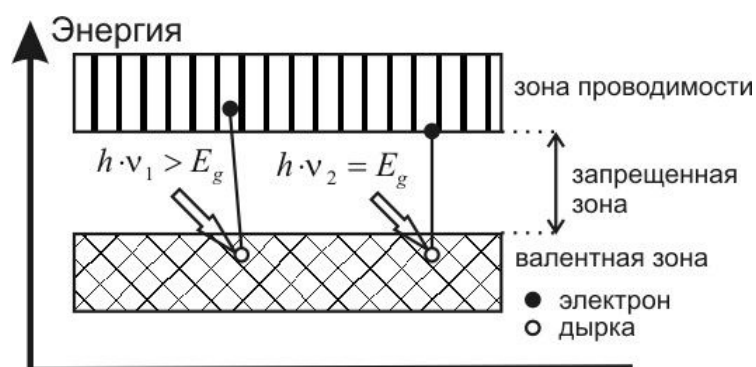


Рис. 5.2 Зонная структура беспримесного полупроводника с собственной проводимостью

Наиболее распространенный полупроводник для изготовления фотоэлементов - это кремний. Кремний расположен в четвертой группе элементов по таблице Менделеева, и его валентность равна четырем. Если четырехвалентный атом кремния заместить в кристаллической решетке атомом меньшей валентности (трех валентным бором), то возникает акцепторный узел в решетке, захватывающий свободные электроны (рис.5.3). Энергетические уровни акцепторных атомов располагаются в запрещенной зоне, вблизи валентной зоны. Отсутствие свободных электронов приводит к

появлению положительно заряженных состояний, называемых дырками, которые перемещаются через вещество как свободные носители. Полупроводники с примесью акцепторных атомов имеют в качестве основных носителей дырки и называются полупроводниками р-типа. И наоборот, атомы большей валентности (например, фосфор из пятой группы) являются донорами электронов. Полупроводники с примесью донорских атомов имеют основными носителями электроны проводимости и называются полупроводниками n-типа.

Материалы с примесной проводимостью того или иного типа характеризуются более высокой электропроводностью, чем химически чистые исходные материалы.

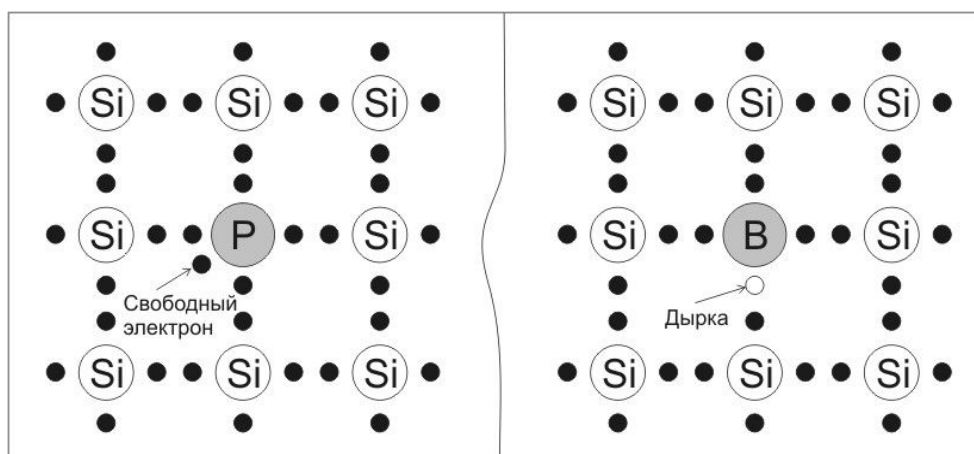


Рис.5.3 Примесная проводимость полупроводника кремния n-типа (слева) и р-типа (справа)

#### 5.4 Электроно-дырочные переходы

Если соединить полупроводник n-типа и р-типа, то на границе образуется так называемый р - n переход. Как было, описано выше, в полупроводнике n-типа имеется избыток свободных электронов, а в полупроводнике р-типа имеется избыток дырок. Это приводит к тому, что свободные электроны из n-типа перейдут к акцепторам р-типа, соответственно и дырки будут двигаться в обратном направлении. Через некоторое время устанавливается равновесие. Электрическое поле, возникшее вследствие аккумуляции зарядов противоположного знака по обе стороны перехода, уравнивает диффузию, возникшую вследствие различия концентрации свободных электронов и дырок. Теперь результирующее движение зарядов происходит с преобладанием отрицательных зарядов в р-области и положительных - в n-области.

Запрещенная зона существует во всех материалах, и между энергиями зоны проводимости и валентной зоны возникает скачок потенциала.

## 5.5 Фотоэлектрический элемент, фотоэлектрический модуль и батарея

Основой любой установки в фотовольтаике всегда является *фотоэлектрический модуль*. Фотоэлектрический модуль - это комбинация электрически соединенных между собой *фотоэлементов*. *Солнечная батарея* это электрическое соединение модулей (рис.5.4).

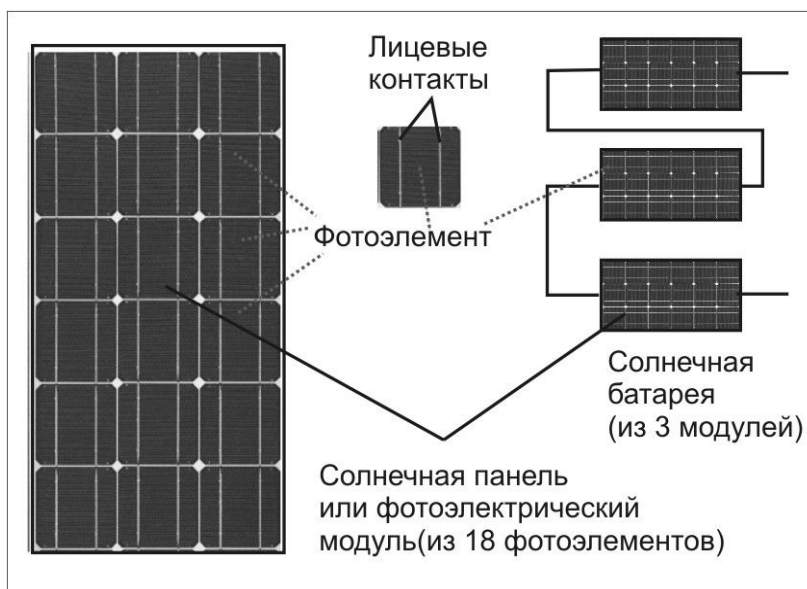


Рис.5.4 Фотоэлемент, солнечная панель и солнечная батарея.

*Фотоэлектрический элемент (фотоэлемент)* используется для получения электроэнергии за счет преобразования солнечного излучения. Фотоэлемент можно рассмотреть как *диод*, состоящий из полупроводников *n*- типа и *p*- типа с образованной зоной, обеднённой носителями, поэтому неосвещенный фотоэлемент подобен диоду и может быть описан как диод.

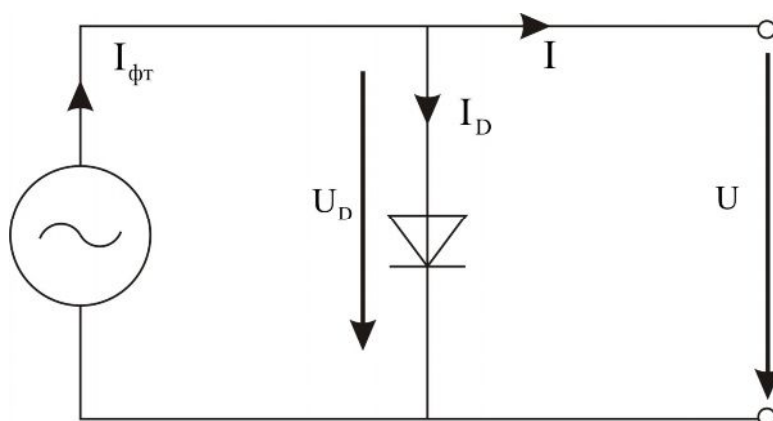


Рис.5.5 Упрощенная схема замещения освещенного солнечного элемента

Ток, протекающий по фотоэлементу в зависимости от напряжения:



$$I = -I_D = -I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{U_D}{m \cdot U_{mmp}}\right) - 1 \right), \quad (5.2)$$

где  $I_D$  - ток насыщения, А;  $m$  - фактор диода;  $U_D$  - напряжение на элементе, В;  $U_{mmp}$  - температурное напряжение при 25 °С,  $U_{mmp} = 25,7$  мВ.

Ток насыщения (также называется током утечки или диффузионным током) – ток через переход при обратном смещении, меньшем напряжения пробоя. Для хороших солнечных элементов он составляет  $10^{-10}$  А. Фактор диода можно принять равным 1, или выбрать от единицы до пяти.

Освещенный солнечный элемент в схеме замещения выглядит как источник питания, параллельно соединенный с диодом (рис.5.5). Источник питания вырабатывает *фототок*, который прямо пропорционален мощности приходящей солнечной радиации:

$$I_{\phi m} = \kappa \cdot G_{gl}, \quad (5.3)$$

где  $\kappa$  - коэффициент пропорциональности приходящей солнечной радиации, А·м<sup>2</sup>/Вт;  $G_{gl}$  - приходящая солнечная радиация, Вт/ м<sup>2</sup>;  $I_{\phi m}$  - фототок, А.

Учитывая первый закона Кирхгофа (сумма токов в узле равна нулю), составим уравнение, позволяющее построить *вольт-амперную характеристику* (ВАХ) солнечного элемента для простой схемы замещения:

$$I = I_{\phi m} - I_D = I_{\phi m} - I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{U_D}{m \cdot U_{mmp}}\right) - 1 \right). \quad (5.4)$$

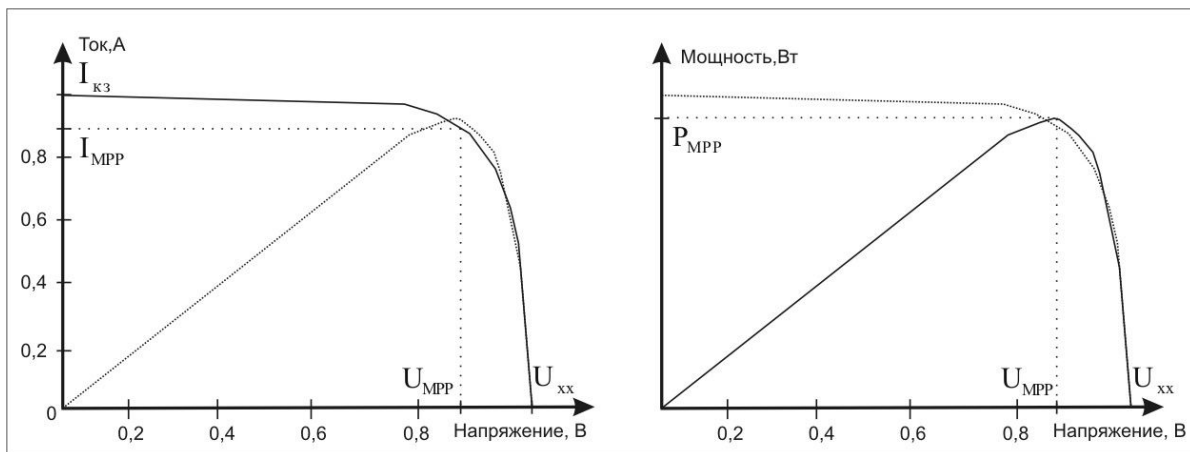


Рис.5.6 ВАХ солнечного элемента и зависимость мощности элемента от напряжения

*Фотоэлектрический модуль (солнечная панель)* – состоит из электрических последовательно и параллельно соединенных фотоэлементов (рис.5.4). На рисунке изображена солнечная панель, состоящая из 18 фотоэлементов. Количество фотоэлементов и их соединений зависит от необходимой мощности солнечного модуля и его необходимых эклектических характеристик.

Стандартные модули состоят из фотоэлементов, количество которых доходит до 72 (например, модуль фирмы SANYO). Мощности одной панели можно встретить в различных диапазонах от 30 Вт пик до 200 Вт пик.

Для того, чтобы можно было сравнивать различные солнечные модули, их электрические характеристики измерялись при определенных условиях, называемых «стандартными условиями». Под стандартными условиями понимается три параметра – интенсивность солнечного излучения равна 1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура солнечного модуля равна 25 °С, масса атмосферы АМ=1,5.

*Ток короткого замыкания  $I_{кз}$* , А. В случае короткого замыкания напряжение элемента равно нулю, а ток короткого замыкания достигает в этом случае своего максимального значения.

*Напряжение холостого хода  $U_{xx}$* , В. В режиме холостого хода ток равен нулю, а напряжение на контактах достигает своего максимального значения.

*MPP (maximum power point) точка пиковой мощности  $P_{MPP}$* , Вт пик или Вт. На рис. 5.6 представлена кривая мощности в зависимости от напряжения. Мощность представляет собой произведения тока на напряжения ВАХ. В зависимости от напряжения, а также присоединенной нагрузки изменяется выходная мощность солнечной панели. Рабочая точка, в которой выходная мощность достигает своего максимального значения, называется точкой пиковой мощности (MPP). Значения тока и напряжения, соответствующие MPP, называются соответственно *током пиковой мощности  $I_{MPP}$*  и *напряжением пиковой мощности  $U_{MPP}$* . Часто точка пиковой мощности имеет единицу измерения [Вт пик], потому что в реальности солнечный модуль имеет меньшую мощность, чем мощность MPP.

*Фактор кривизны (или параметр насыщения) ФН*. Фактором кривизны называется отношение мощности MPP к продукту тока короткого замыкания на напряжение холостого хода.

$$\Phi H = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{U_{xx} I_{кз}} \quad (5.5)$$

ФН определяет качественный критерий солнечного модуля и показывает как близко ВАХ солнечного модуля приближена к прямоугольнику из  $U_{xx}$ ,  $I_{кз}$ . ФН обычно всегда меньше единицы и находится в пределах 0,7 и 0,85.

*Коэффициент полезного действия (КПД) солнечного модуля [%]*. КПД солнечного модуля это отношения выходной мощности солнечного модуля к мощности приходящей солнечной радиации.

$$\Phi H = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{G_{gl}} \cdot 100\% = \frac{\Phi H \cdot U_{xx} I_{кз}}{G_{gl}} \cdot 100\% . \quad (5.6)$$

*Одним из главных недостатков фотовольтаика является низкий КПД солнечных модулей. Для кремневых панелей КПД достигает 10 – 15 %.*

КПД солнечных элементов зачастую определяет ширина запрещенной зоны [ $E_g$ ]. Как было описано выше, ширина запрещенной зоны и есть минимальная энергия фотона, которая способна поднять электрон из валентной зоны в зону проводимости. *Фотоны, обладающие меньшей энергией, не пригодны, так как не смогут переместить электрон в зону проводимости. Фотоны с большей энергией, чем  $E_g$ , могут для поднятия использовать минимальную необходимую энергию, а оставшаяся превращается в тепло. Каждый фотон может сгенерировать только одну пару «электрон и дырка».* Так как солнечный спектр представляет собой длины волн от 0,29 ÷ 2,5 мкм, то соответственно и фотоны имеют разную энергию. Любой солнечный элемент спроектирован так, чтобы больше фотонов поглотить и преобразовать его в фототок.

*С одной стороны, чем меньше ширина запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости, тем большая часть солнечного спектра может быть пригодна для выбивания электрона из валентной зоны в зону проводимости.* Так как фототок прямо пропорционален количеству поглощенных фотонов в единицу времени, поэтому меньшая ширина запрещенной зоны соответствует большему значению фототока.

*С другой стороны ширина запрещенной зоны представляет собой потенциальный барьер в p-n переходе. Меньшая ширина запрещенной зоны приводит к маленькому напряжению холостого хода.* Учитывая, что выходная мощность солнечного элемента зависит от произведения напряжения на ток, то это приводит к маленькому КПД элемента. Если взять полупроводник с большой шириной запрещенной зоны, то это приведет к большему напряжению холостого хода. Одновременно меньшая часть солнечного спектра может быть поглощена, что соответствует маленькому значению фототока. В итоге выходная мощность – произведение значительного напряжения и маленького тока, будет снова маленькой.

Данные пример показывает, что для солнечного спектра имеется полупроводник с оптимальной шириной запрещенной зоны. На рис.5.7 показана такая зависимость теоретического максимального КПД от ширины запрещенной зоны различных полупроводников. Видно, что используемые полупроводники в самом лучшем случае (теоретически) могут достичь КПД, равного 30%. Однако в реальности КПД солнечных элементов намного меньше теоретических КПД.

*Солнечная батарея* (рис.5.4) представляет собой комбинацию электрически соединенных между собой фотоэлектрических модулей. Комбинация выбирается в зависимости от необходимых электрических параметров как ток и напряжение. Солнечные батареи общей мощностью 1-3 кВт применяются для энергообеспечения автономных потребителей. Имеются солнечные станции, предназначенные для выработки

электроэнергии и подпитки электрических сетей, мощности которых достигают нескольких МВт.

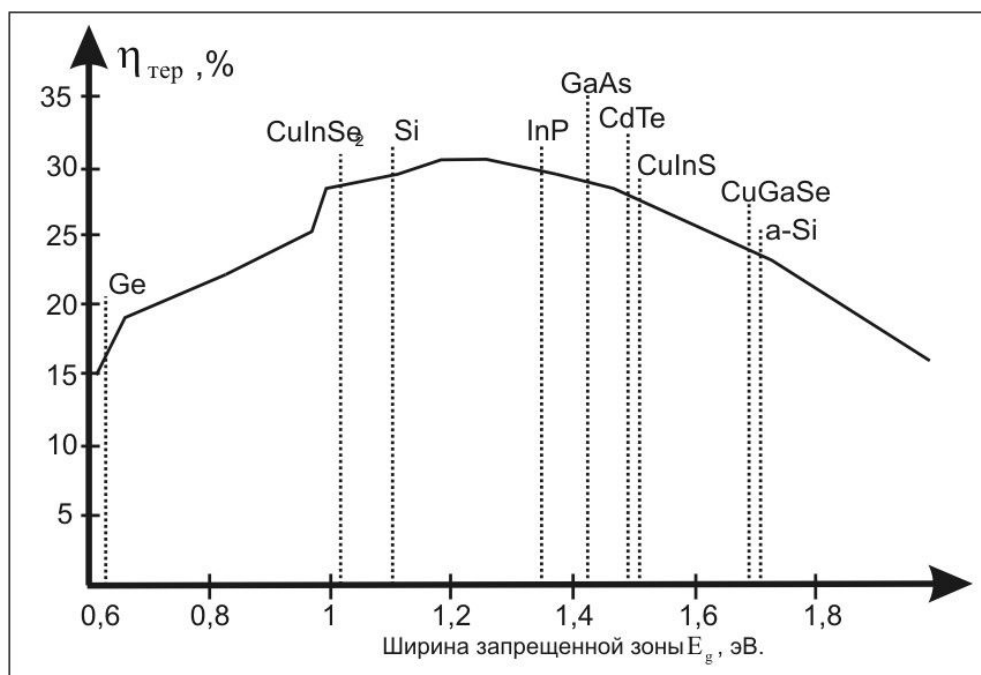


Рис.5.7 Теоретические КПД для различных солнечных элементов .

## 5.6 Типы фотоэлементов

Как было указано выше, что для полупроводников, имеющих ширину запрещенной зоны между 1 и 3 эВ, максимальное теоретическое КПД может быть достигнуто 30%. Наиболее распространенными из выпускаемых промышленностью солнечных элементов являются кремневые элементы.

*Монокристаллины и поликристаллины кремния.* Кремний на сегодняшний день является одним из самых распространенных элементов для производство фотоэлектрических модулей. Однако из-за маленькой абсорбции солнечного излучения, солнечные элементы из кристалла кремния изготавливаются обычно шириной 300 мкм. КПД фотоэлемента из монокристалла кремния достигает 17%. Если взять фотоэлемент из поликристалла кремния, то для него КПД лежит на 5% ниже, чем из монокристалла кремния. Граница зерен поликристалла является центром для рекомбинации носителей зарядов. Размер кристалла поликристаллина кремния может колебаться от нескольких мм до одного см.

*Арсенид галлия (GaAs).* Солнечные элементы из арсенида галлия в лабораторных условиях уже показали КПД, равный 25%. Арсенид Галлия, разработанный для оптоэлектроники, сложно производить в больших количествах и для солнечных элементов является достаточно дорогим. Солнечные элементы из арсенида галлия применяются совместно с концентраторами, а так же для космонавтики.

*Тонкопленочные фотоэлементы технологии.* Основным недостатком кремневых элементов является их высокая стоимость. Имеются тонкопленочные элементы, которые изготавливаются из аморфного кремния (a-Si), теллурида кадмия (CdTe) или купрум-индий диселенида (CuInSe<sub>2</sub>). Преимущество тонкопленочных фотоэлементов – экономия сырья и материалов и более дешевое производство по сравнению с кремниевыми фотоэлементами. Поэтому можно сказать, что тонкопленочные изделия имеют перспективы для применения в фотоэлементах. Недостатком является, что некоторые материалы являются достаточно токсичными, поэтому безопасность продукции, а так же “recycling” играют важную роль. Кроме того, теллурид является исчерпаемым ресурсом, по сравнению с кремнием. КПД тонкопленочных фотоэлементов достигает 11 % (CuInSe<sub>2</sub>).

### 5.7 Вольтамперные характеристики

Для достижения желаемых электрических выходных параметров солнечного модуля, солнечные элементы соединяются электрически между собой последовательно и параллельно (рис.5.8).

Огромное количество солнечных модулей рассчитываются для совместной работы с 12 В свинцовым аккумулятором, для таких модулей необходимо соединить от 36 до 40 стандартных фотоэлементов последовательно. Для последовательно соединенных фотоэлементов характерно, что ток, протекающий по всем элементам одинаков, а общее напряжение равно сумме напряжений на элементах (рис.5.8).

При параллельном соединении одинаковых солнечных элементов, напряжение на выводах остается таким же, как и напряжение на элементах, а ток цепи становится равным сумме токов на элементах. Большой ток одновременно означает большие потери мощности, поэтому, по возможности, надо избегать параллельного соединения элементов.

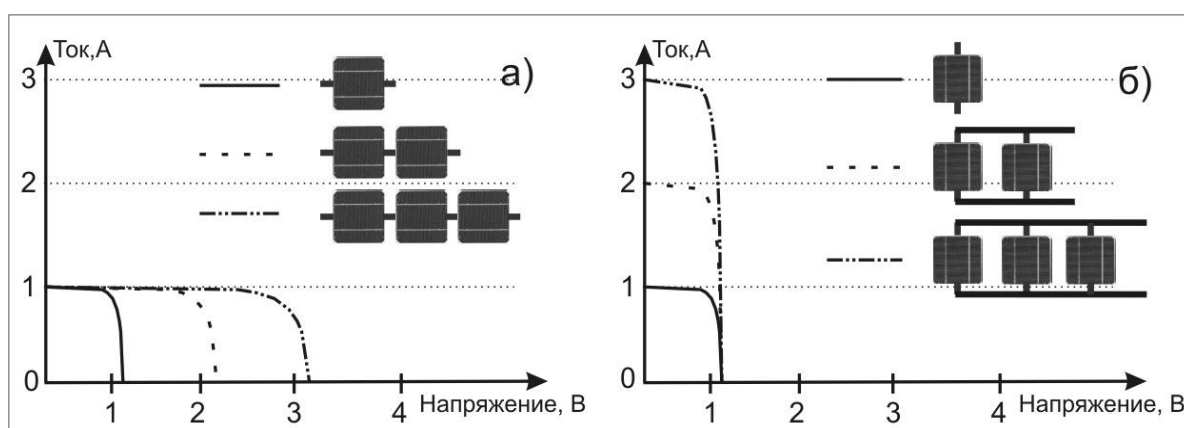


Рис.5.8 ВАХ для а) одного и последовательно соединенных 2, 3 идентичных фотоэлементов; б) одного и параллельно соединенных 2, 3 идентичных фотоэлементов

Выработка электричества фотоэлектрическим модулем зависит так же от климатических данных. На фотоэлектрический модуль особенно влияет приходящая солнечная радиация, а также температура самого модуля. На рис.5.9 (а) показана ВАХ для модуля с постоянной температурой и разной приходящей солнечной радиацией, рис.5.9 (б) ВАХ для модуля при разной температуре солнечного модуля и постоянной приходящей солнечной радиацией. Как уже было показано выше, вырабатываемый фототок прямопропорционален приходящей солнечной радиации по (5.3).

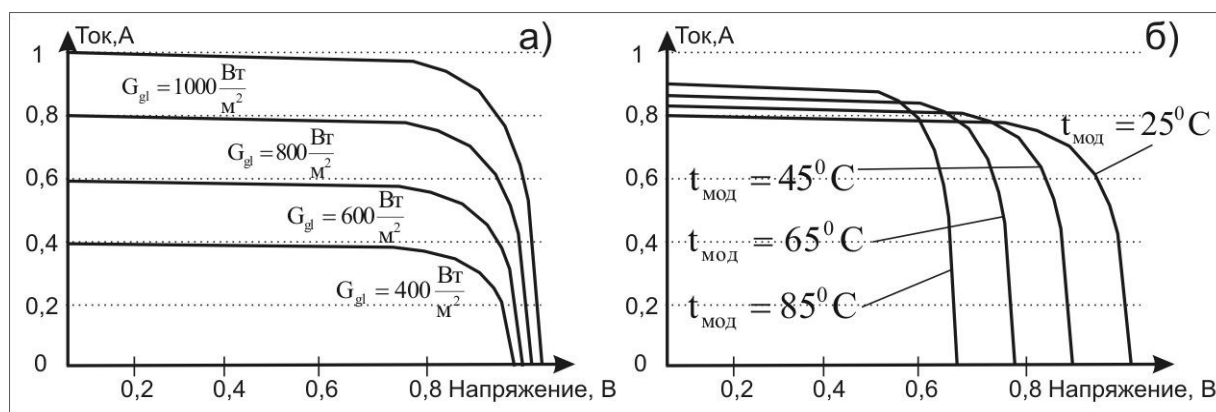


Рис.5.9 ВАХ для солнечной панели а) при одинаковой температуре и разной приходящей солнечной радиации; б) при разной температуре и одинаковой приходящей солнечной радиации

Соответственно, при повышении мощности приходящей солнечной радиации, увеличивается ток короткого замыкания. Напряжение холостого хода тоже повышается, но очень незначительно. При различных температурах солнечной панели и постоянной приходящей солнечной радиации ВАХ показана на рис.5.9 (б). Ток короткого замыкания незначительно повышается с повышением температуры солнечного модуля, в связи с усилением термической генерации. Однако, повышение температуры модуля понижает диффузионное напряжение в р-п переходе, что, в свою очередь, сказывается на низком значении напряжения холостого хода. В общем, с повышением температуры мощность модуля падает. Иногда в паспорте на панели указываются коэффициенты, показывающие влияние на выходные электрические параметры солнечной панели. Характерные значения для модулей: изменение напряжения холостого хода – около 0,4 (% на 1 °С), изменение тока короткого замыкания – около 0,06 (% на 1 °С), изменение выходной мощности – около 0,5 (% на 1 °С).

Главное успех, достижение преимущество при эксплуатации фотоэлектрических модулей - их равномерное освещение. Однако, заплыение, метеорологические осадки, опадание листвы с окружающих деревьев, экскременты птиц могут привести к затенению отдельных частей модуля. Затенение очень сильно влияет на выходную мощность панели. Если взять солнечный коллектор, то можно сказать, что уменьшение мощности пропорционально части затененной площади, в то время как затенение

одной тридцатой части модуля фотовольтаика, может уменьшить мощность в два раза! Поэтому затенение модуля фотовольтаика недопустимо с энергетической стороны, а также опасно, так как может повредиться фотоэлемент. На рис.5.10 [Qua07] показана ВАХ фотоэлектрического модуля, состоящего из 36 фотоэлементов, соединенных последовательно, причем один из фотоэлементов затенен на 75%. В данном случае, ток, протекающий по всем элементам, будет одинаковым. ВАХ фотоэлемента, затененного на 75%, находится в части отрицательного напряжения, т.е. данный элемент работает как нагрузка.

Для построения ВАХ частично затененного модуля, суммируются напряжения 35 освещенных и 1 затененного элемента, которые в сумме дают напряжение модуля. Такие вычисления осуществляются для каждого значения тока. Например, возьмем значение тока, равное 0,48 А (в точке, где пунктирная линия пересекает значение тока), значение напряжения 35 освещенных элементов (точка 1 b) равно  $35 \cdot 0,59$  В, а 1 затененного элемента точка (1 a) - 14 В. Суммируя данные напряжения, получаем точку 1 со значением напряжении 5,9 В ( $19,95 - 14$  В). Из ВАХ легко понять, что хотя затенение модуля соответствует площади около 2% (75% 1-го элемента), мощность падает почти на 70% с 20,3 Вт до 6,3 Вт. Если интенсивность солнечной радиации повышается, то соответственно повышаются и потери. Дополнительно к потерям, элемент испытывает сильный нагрев, который может привести к его разрушению. При затенении появляются или небольшие зоны, размерность которых в мм, их называют *горячие точки* («Hot Spot»), что приводит к расплавлению материала солнечного элемента, или повреждается герметичность элемента.

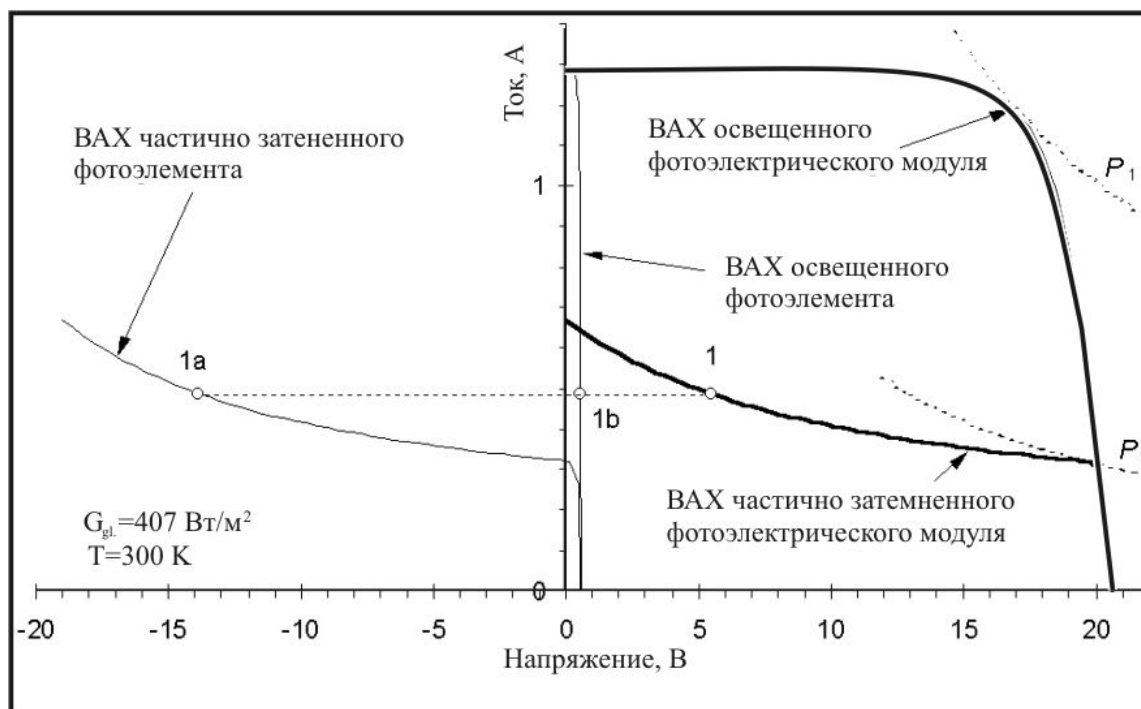


Рис.5.10 ВАХ модуля, один элемент которого затенен на 75%

Для защиты модуля от «Hot spot» или термического разрушения, в солнечные модули параллельно элементам подключаются так называемые *байпасные диоды*.

При нормальной эксплуатации фотоэлектрического модуля (все элементы освещены) байпасные диоды не работают. В случае затенения ток течет по байпасным диодам (наименьшее сопротивление), которые предотвращают потерю мощности и защищают от перегрева. Обычно на 18 - 24 фотоэлемента подключается один байпасный диод.

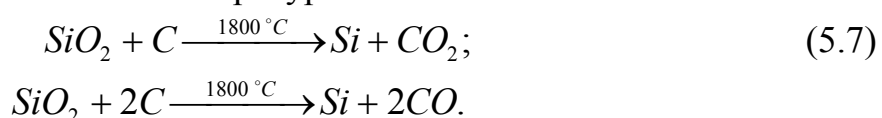
## 5.8 Производство фотоэлементов

В начале 60-х годов фотоэлементы приблизительно стоили 1000\$/Вт пиковой мощности и изготавливались главным образом в космосе. В 70-х годах начался серийный выпуск фотоэлементов, и их цена снизилась до 100\$/Вт. Дальнейший прогресс и снижение стоимости фотоэлементов сделали возможным использование фотоэлементов для бытовых нужд. Особенно для части населения, живущего далеко от линий электропередачи и стандартного электрообеспечения, фотоэлектрические модули могут быть хорошей альтернативой.

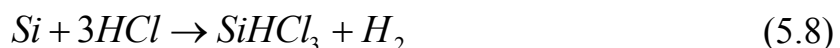
Производство фотоэлементов из кремния можно условно разделить на три основные стадии:

- 1) производство кремния высокой степени чистоты;
- 2) изготовление тонких кремниевых шайб;
- 3) сборка фотоэлемента.

Основным сырьем для производства кремния высокой степени чистоты является кварцевый песок ( $SiO_2$ ). С помощью электролиза расплава получают *металлургический кремний*, который имеет степень чистоты до 98%. Процесс восстановления кремния происходит при взаимодействии песка с углеродом при высокой температуре 1800 °C:



Такая степень чистоты недостаточна для производства фотоэлемента, поэтому он подлежит дальнейшей обработке. Дальнейшее очищение кремния для полупроводниковой индустрии осуществляется практически по всему миру с помощью технологии, разработанной фирмой Siemens. “Siemens процесс” представляет собой очищение кремния путем взаимодействия металлургического кремния с соляной кислотой, в результате чего получают трихлорсилан ( $SiHCl_3$ ):



При температуре 30 °C трихлорсилан ( $SiHCl_3$ ) находится в жидкой фазе, поэтому он легко отделяется от водорода. Далее, неоднократная дистилляция трихлорсилана повышает его чистоту до  $10^{-10}\%$ . Последующим процессом - пиролизом из очищенного трихлорсилана получают поликристаллический кремний высокой степени чистоты. Полученный



поликристаллический кремний не совсем удовлетворяет условиям для использования в полупроводниковой индустрии, однако, для солнечной фотоэлектрической индустрии качество материала достаточно. Поликристаллический кремний является сырьем для производства монокристаллического кремния. Для производства монокристаллического кремния применяются два способа – *метод Чохральского* и *метод зонного плавления*.

*Метод Чохральского* является энергоемким, а также материалоемким. Сравнительно небольшое количество поликристаллического кремния закладывается в тигель и в вакууме расплавляется. Небольшая затравка монокремния опускается на поверхность расплава и затем, закручиваясь, поднимается, вытягивая за собой слиток цилиндрической формы, за счет силы поверхностного натяжения. В настоящее время диаметры вытягиваемых слитков достигают до 300 мм. Длина слитков диаметром 100-150 мм достигает 75-100 см. Кристаллическая структура вытянутого слитка повторяет монокристаллическую структуру затравки. Увеличение диаметра и длины слитка, а также усовершенствование в технологии его распилки позволят уменьшить количество отходов, тем самым, удешевить стоимость получаемых фотоэлементов.

*Ленточная технология.* Технологический процесс, разработанный Mobil Solar Energy Corporation, основан на вытягивании из расплава кремниевых лент и формировании на них фотоэлементов. В расплав кремния погружается частично матрица и благодаря капиллярному эффекту, поликристаллический кремний поднимается, образуя ленту. Расплав кристаллизуется и вынимается из матрицы.

Для увеличения производительности конструируется оборудование, на котором возможно получать до девяти лент одновременно. В результате получается девятиугольная призма. Преимущество лент в том, что они малоотходны из-за того, что исключается процесс резки слитка. К тому же можно легко получать фотоэлементы прямоугольной формы, в то время как круглая форма монокристаллических пластин не способствует хорошей компоновки фотоэлемента в фотоэлектрическом модуле.

Полученные поликристаллические или монокристаллические кремниевые стержни далее должны быть распилены на тонкие шайбы, толщиной 0,2 – 0,4 мм. При распиливании стержня монокристаллического кремния на потери уходят порядка 50% материала. Далее круглые шайбы, не всегда, но зачастую, обрезают для получения квадратной формы.

## **5.9 Фотовольтаик - установки и их компоненты**

Различают два основных вида фотовольтаик - установок:

- 1) автономный фотовольтаик системы, неподключенный к сетям;
- 2) подключенный к сетям.

Как уже видно из названия, основное отличие установок заключается в том, что первые из них не подключены, а вторые подключены к электрическим сетям. На рис.5.11 показана принципиальная схема островной фотовольтаик – установки, состоящей из следующих компонентов. Солнечная батарея – это комбинация электрически соединенных между собой солнечных панелей. Солнечная панель является основным компонентом установки фотовольтаик, которая преобразует солнечную радиацию в постоянный ток. Источник постоянного тока также является обыденная аккумуляторная батарея.

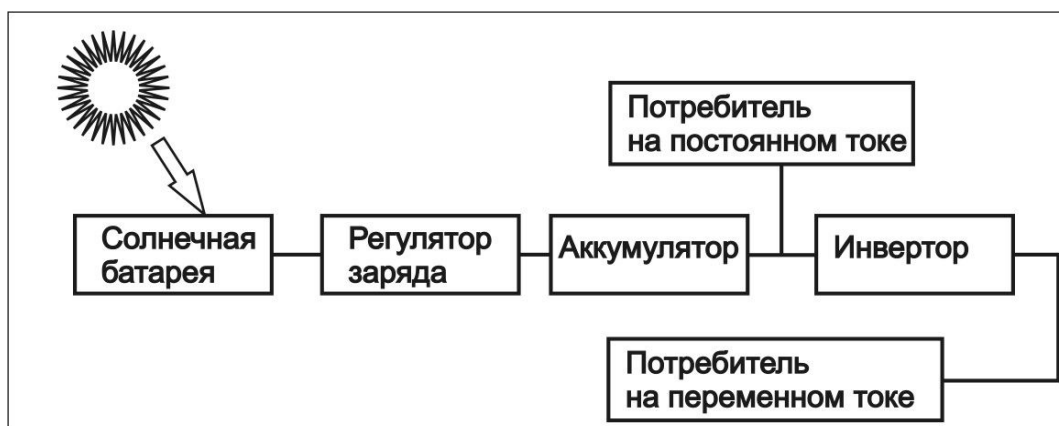


Рис.5.11 Принципиальная схема автономной фотовольтаик - установки

*Инвертор (преобразователь постоянного тока в переменный).* Имеется много потребителей, например часы, калькулятор, которые можно запитать напрямую от солнечной батареи, такие называются потребителями на постоянном токе. Однако большинство электроустановок потребляют переменный ток в 220В и 50 Гц (в США частично 110 В и 60 Гц). Инвертор - компонент фотовольтаик - установки, который преобразует постоянный ток в переменный. Инвертор используется для запитки отдельных потребителей переменного тока, а также для подсоединения солнечных панелей к электрическим сетям. В развитых странах имеются законодательные акты, позволяющие потребителю продавать электроэнергию в электросети. Мощность инверторов варьируется от нескольких ватт до сотен киловатт.

В зависимости от выходной характеристики напряжения различают инверторы, имеющие форму выходного напряжения в виде прямоугольника, трапеции или синусоиды (рис.5.12). Для небольших потребителей до 1 кВт применяются в основном инверторы с формой напряжения в виде прямоугольника. Для потребителей выше 1кВт применяются инверторы, преобразующие напряжения исключительно в синусоидальную форму требуемой частоты. Инверторы с трапециидальной формой напряжения имеют преимущество простоты строения и относительной дешевизны, через такие инверторы можно без проблем питать лампы накаливания, утюги и другие активные нагрузки.

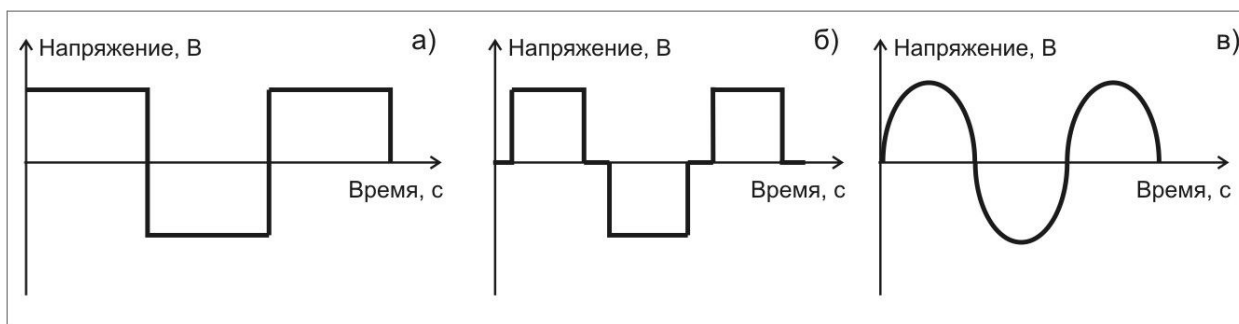


Рис.5.12 Форма выходного напряжения из инвертора а) прямоугольник, б) трапеция, в) синусоида

На рис.5.13 [Qua07] представлена принципиальная схема инвертора с трапецидальной формой выходного сигнала напряжения, называемого *двухполупериодный мост*. Данная схема состоит из четырех *тиристоров*. Тиристор - это полупроводниковый прибор, способный переключаться. Источник постоянного тока через двухполупериодный мост подключен к сети переменного тока. Трансформатор между сетями переменного тока служит для повышения (или понижения) напряжения. Если включать периодически группы транзисторов 1 и 3, а так же 2 и 4, то на выходе возникает напряжение в форме трапеции, показанное на этом же рисунке. Схему можно упростить путем замены тиристоров 1 и 2, на неуправляемые *диоды*. Включение транзисторов осуществляется с помощью управляемого угла (а).

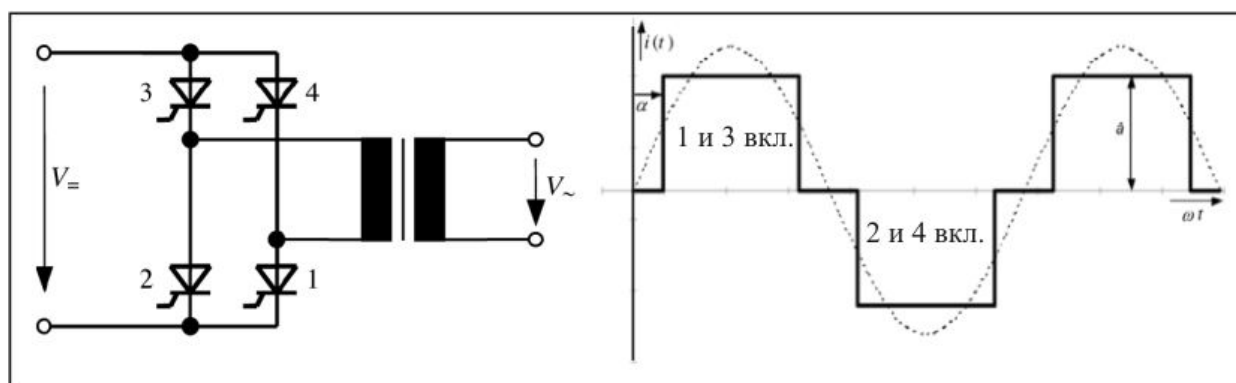


Рис.5.13 Инвертор (схема двухполупериодного моста) и форма выходного сигнала напряжения

*Аккумулятор (аккумуляторная батарея)*. Аккумулятор является компонентом, который позволяет накапливать электрическую энергию. Аккумулятор особенно необходим для установок, которые не подключены к сетям, чтобы накапливать энергию для использования в ночное время. Аккумуляторы, к сожалению, имеют меньшую долговечность работы, чем солнечные панели, поэтому они в процессе эксплуатации должны несколько раз заменяться.

Автомобильные аккумуляторы не могут быть применены в фотовольтаике, потому что они рассчитаны на короткую разрядку большой мощности. В автомобиле они применяются, чтобы завести машину, и сразу же начинают перезаряжаться от машинного генератора. В фотовольтаике необходимы батареи, которые бы выдерживали многочисленные циклы относительно равномерных разрядов и зарядов.

При выборе аккумуляторов для фотовольтаика одним из параметров является *емкость аккумуляторной батареи*. Единицы измерения емкости аккумулятора – ампер · час (Ач). Традиционная емкость аккумуляторных батарей - 100 Ач, т.е. батарея может выдавать до полного разряда 1 А в течение 100 часов, или 2 А в течение 50 часов. *Если взять две аккумуляторные батареи 100 Ач и 12 В, то при последовательном соединении они дадут 100 Ач и 24 В, а при параллельном 200 Ач и 12 В.*

При использовании аккумуляторных батарей необходимо также следить за правильным зарядом и разрядом. *Нельзя разряжать батарею на все 100%, особенно это опасно для кислотно-свинцовых аккумуляторов, которые могут потерять напряжение.* Максимальную долю (в процентах) от полного заряда аккумулятора, на которую его можно разряжать, называют *допустимой глубиной разряда*. Большинство аккумуляторных батарей, используемых для фотоэлектрических установок, имеют допустимую глубину разряда от 50% до 80%. Срок службы аккумуляторной батареи при ее эксплуатации напрямую зависит от глубины разряда. К примеру, если аккумуляторную батарею ежедневно при эксплуатации допускать разрядку до 50%, она может прослужить в два раза больше времени, по сравнению с разрядкой до 80%.

В фотовольтаике нашли применение следующие типы аккумуляторов: кислотно-свинцовые и щелочные батареи.

*Кисотно-свинцовые батареи.* Одним из наиболее распространенных типов аккумуляторов для небольших фотовольтаик - систем является кислотно-свинцовый. Данный вид имеет плохую гравиметрическую энергоплотность, которая составляет 20 – 30 Втч/кг, что отражается на весе аккумулятора. Свинцовый аккумулятор запасает энергию, путем превращения электрической энергии в химическую. При потреблении энергии происходит обратный процесс, где химическая энергия превращается в электрическую. Химическая энергия запасается на двух электродах, положительном и отрицательном, между которыми возникает разность потенциалов. Схематическое строение аккумуляторной батареи (в заряженном состоянии) показано на рис.5.14 [Pho06]. В полном заряженном состоянии аккумулятора положительный электрод (+) состоит из диоксида свинца ( $PbO_2$ ) и отрицательный электрод из пористого свинца ( $Pb$ ). Пористость обоих электродов составляет 50% и активная масса должна иметь мелкокристаллическую структуру, для достижения активной поверхности. Оба электрода погружены в раствор серной кислоты ( $H_2SO_4$ ). Электроды разделены непроницаемой перегородкой – сепаратором. Во время

разрядки аккумулятора оба вещества растворяются и образуют сульфат свинца ( $PbSO_4$ ), тем самым концентрация электролита снижается. При зарядке аккумулятора происходит обратный процесс:

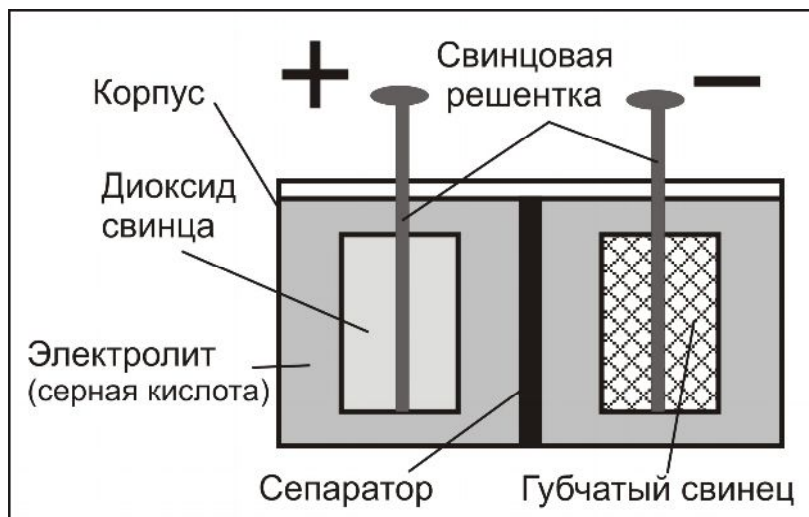
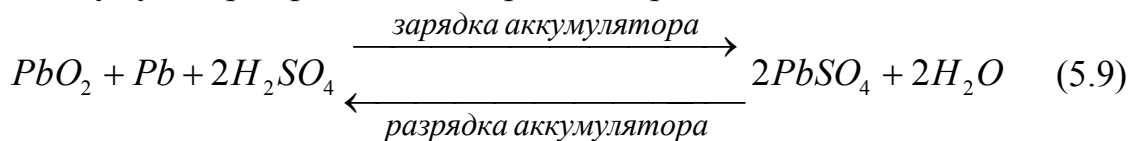


Рис. 5.14 Кислотно-свинцовая Аккумуляторная батарея

Наряду с основными реакциями происходят и другие химические реакции, например, образование молекул газов кислорода и водорода соответственно на положительном и отрицательном электродах. Газы улетучиваются, что приводит к необходимости регулярно пополнять электролит водой. Имеются и требования к размещению аккумуляторной батареи: это должно быть обязательно хорошо проветриваемое место во избежание критической концентрации кислорода и водорода. Кроме этого, малейшее испарение электролита может вызвать коррозию на электроприборах, поэтому в жилом помещении не рекомендуется держать аккумуляторы с жидким электролитом.

Альтернативой для аккумуляторов, которые могут быть помещены в жилых помещениях, являются *гелиевые аккумуляторы*. В традиционных гелиевых аккумуляторах загустевание электролита происходит за счет добавления силикатного геля. Основными преимуществами гелиевых аккумуляторов является то, что они даже при разрушении не «протекают», не нуждаются в уходе – пополнении электролита водой. Однако, стоимость гелиевых батарей превосходит стоимость кислотных свинцовых батарей с жидким электролитом, они более чувствительны к перезарядке и имеют меньшую продолжительность работы.

*Щелочные батареи.* К щелочным батареям относятся такие батареи как никель-кадмиевые и никель-металлические, которые, так же, как и кислотные, имеют отрицательный и положительный электроды,

размещенные в электролите. Электроды представляют собой никелевый и кадмиевый или никеливый и железный элементы, погруженные в гидроксид калия. Преимущество таких батарей: их незначительная зависимость от температуры, поэтому такие батареи могут использоваться при холодных температурах.

#### *Регулятор заряда.*



Рис. 5.15 Регуляторы заряда некоторых фирм [CON].

Необходимо следить за работой кислотно-щелочных аккумуляторов с помощью регулятора заряда. Для предотвращения от перезаряда или полного разряда. Данный регулятор отслеживает напряжение батареи, которое начинает повышаться при заряде или понижаться при разряде.

При перезаряде батареи наблюдается чрезмерная потеря электролита, что уменьшает долговечность батареи и учащает уход за батареей (пополнение электролита). Одновременно, при глубоком разряде батареи, сокращается ее долговечность. Поэтому рекомендовано иметь регулятор заряда с выключателем низкого напряжения, во избежание полной разгрузки.

### **5.10 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач**

1. Что такое фотоэффект?
2. Чем отличается собственная проводимость от примесной?
3. Зонная теория.
4. Что такое фотоэлемент, фотоэлектрический модуль и батарея?
5. Нарисуйте ВАХ солнечного элемента и отобразите основные показатели.
6. Какого максимального теоретического КПД можно достичь для полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей?
7. Какие типы фотоэлектрических модулей Вы знаете?
8. Перечислите компоненты фотоэлектрической станции.
9. Электрическая схема замещения фотоэлектрического модуля.
10. Что такое инвертор?
11. Для чего нужен регулятор заряда?
12. Какие виды аккумуляторов используются для фотоэлектрической станции?

**Задача №1.** Определить пиковую мощность и напряжение пиковой мощности солнечной батареи, состоящей из 12 одинаковых солнечных модулей Sanyo HIT 210 NKHES, характеристики которых приведены в табл.5.1, подключенных в три ряда по четыре модуля в каждом.

Табл.5.1 [Wag09].

Некоторые характеристики модуля Sanyo HIT 210 NKHES

$U_{MPP}$ , В	$P_{MPP}$ , Вт пик	Количество элементов, шт.	Габариты (lxbxh), мм
40,7	205	72	1580x798x35

**Решение:**

1. Для наглядного представления нарисуем схему батареи, (рис.5.16).

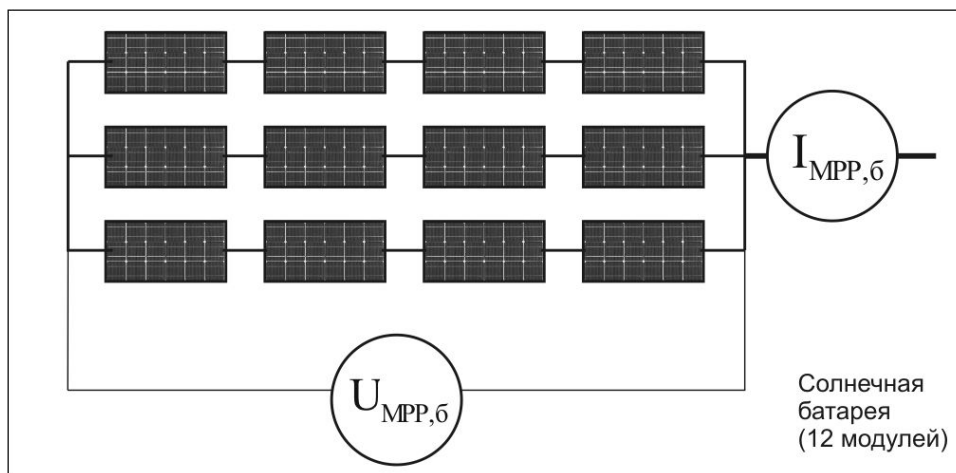


Рис. 5.16 Схема соединения солнечных модулей в батарее

2. Определяем напряжение пиковой мощности для батареи:

$$U_{MPP,б} = 4 \cdot U_{MPP} = 4 \cdot 40,7 = 162,8 \text{ (В)}.$$

3. Определяем ток пиковой мощности для модуля:

$$I_{MPP} = \frac{P_{MPP}}{U_{MPP}} = \frac{205}{40,7} = 5,05 \text{ (А)}.$$

4. Определяем ток пиковой мощности для батареи:

$$I_{MPP,б} = 3 \cdot I_{MPP} = 3 \cdot 5,05 = 15,15 \text{ (А)}.$$

5. Определяем пиковую мощность батареи:

$$P_{MPP,б} = U_{MPP,б} \cdot I_{MPP,б} = 162,8 \cdot 15,15 = 2466,42 \text{ (Вт пик)}.$$

## ГЛАВА 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

### 6.1 Водные ресурсы

Водные ресурсы земного шара огромны. Из них ничтожную долю объема гидросферы составляют пресные воды. Основные запасы воды сосредоточены в мировом океане (около 94%), более 5% в ледниках и подземных горизонтах, все остальные составляющие гидросферы (0,026%) приведены в табл. 6.1 [Льв74].

Табл. 6.1

Запасы воды в гидросфере

Составляющие гидросферы	Объем воды, тыс. км <sup>3</sup>	% общего объема
Мировой океан	1370323,2	93,96
Подземные воды	60000	4,12
В том числе активного водообмена	4000	0,27
Ледники	24000	1,65
Озера	280	0,019
Почвенная влага	85	0,006
Пары атмосферы	14	0,001
Речные воды	1,2	0,0001
Итого в запасы воды в гидросфере	1454193	100

Главную роль в хозяйственном использовании водных ресурсов играют речные воды. Их характерными особенностями является ежегодная возобновляемость в результате *круговорота воды в природе* (рис.6.1) [Qua07] и неравномерность распределения во времени и в пространстве. Речной сток образуется за счет осадков, выпадающих на поверхность суши. Часть этих осадков превращается в сток, непосредственно попадая в реки с поверхности земли, и называются поверхностным стоком рек. Другая часть осадков просачивается в грунт, образуя запасы подземных вод, которые являются источником подземного стока рек. Речной сток частично испаряется в атмосферу, а частично используется для хозяйственных нужд человека. При этом вода либо безвозвратно теряется для реки, входя в состав производимой продукции или испаряясь в атмосферу, либо возвращается в реку виде возвратных или сточных вод. Значительная часть стока большого числа рек попадает в океаны, озера или моря, как показано на рисунке 6.1. Речные воды вместе с осадками, выпадающими на поверхность океанов, морей и озер, перемешиваются с запасами их вод и частично испаряются под воздействием солнечной энергии.

Около 445.000 км<sup>3</sup> воды ежегодно испаряется с поверхности океанов, более 400.000 км<sup>3</sup> выпадает в виде осадков обратно в океан. Около 112.000 км<sup>3</sup> воды за счет общей циркуляции выпадают в виде осадков над сушей и частично превращаются в речной сток в новом цикле круговорота воды в природе.



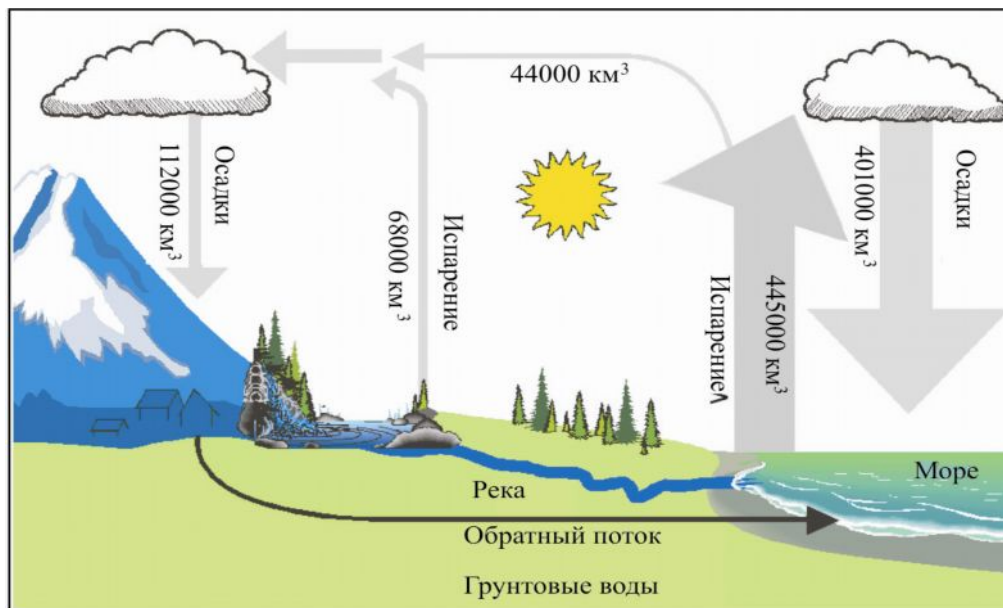


Рис.6.1 Круговорот воды в природе

Энергия воды является самым потенциальным источником, имеющим огромное значение для выработки электрической энергии в КР. Кыргызстан, а также европейские страны как Норвегия, Исландия большую часть электроэнергии вырабатывают на гидроэнергетических установках, а именно - гидроэлектростанциях.

В истории человечества «водяные двигатели» всегда играли особую роль. На протяжении многих веков различные водяные машины были главным источником энергии в производстве. Затем развитие тепловых (а позже электрических) двигателей сильно сузило сферу их применения. Однако, везде, где имелись дешевые гидроресурсы (ручей с быстрым течением, водопад или порожистая река), водяной двигатель мог оказаться предпочтительнее всех других, поскольку был очень прост по своей конструкции, не требовал топлива и имел сравнительно высокий КПД. После того, как в первой половине XIX века была изобретена водяная турбина с очень высоким КПД, гидроэнергетика пережила как бы второе рождение. С началом электрификации по всему миру развернулось строительство гидроэлектростанций, на которых электрогенераторы получали свой привод от мощных гидротурбин различных конструкций. И в наше время на долю гидротурбин приходится немалая часть мирового производства электроэнергии.

В табл.6.2 [USD05] приведена доля выработки электроэнергии за счет гидроэлектростанций в некоторых странах Европы, Азии, Америки..

Из табл.6.2 очевидно, что выработка электричества за счет энергии водных ресурсов является очень значимой для КР. Согласно многочисленным исследовательским отчетам, потенциал энергии водных ресурсов в КР освоен лишь на 10%, поэтому дальнейшее развитие и использование водных ресурсов в энергетических целях очень перспективно.

Доля выработки электроэнергии за счет ГЭУ

Страна	Парагвай	Норвегия	КР	Бразилия	Венесуэла	Канада	Швейцария	Швеция	Россия	КНР	США
%	99,9	98,9	90	83,3	66,8	58,3	53,9	42,2	18,8	15,8	6,5

*Гидроэнергетические ресурсы речного стока.* Гидравлическая энергия рек представляет собой работу, которую совершает текущая в них вода. В естественном состоянии эта работа расходуется на преодоление внутреннего сопротивления движению воды, сопротивления на трение в русле и различное эрозионное воздействие (размыв дна и берегов русла, перемещение продуктов размыва).

Силой, осуществляющей работу водного потока, является собственный вес воды. Действие воды определяется разностью уровней воды в начале и конце рассматриваемого участка водотока (рис.6.2) [Обр88].

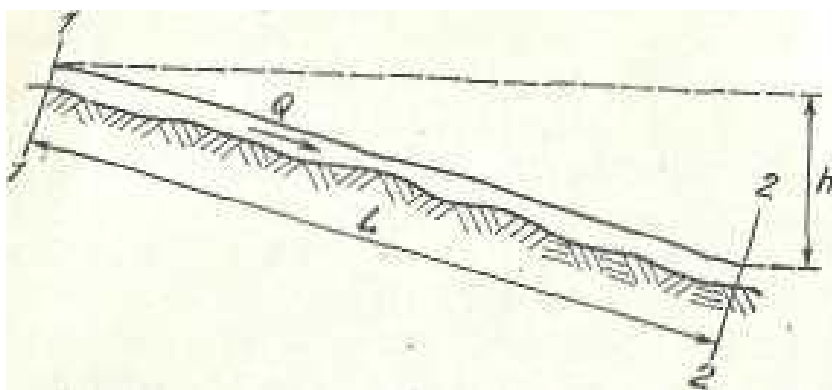


Рис. 6.2 Схематический продольный профиль участка реки

Если падение участка водотока (реки) длиной  $L$ , м, составляет  $H$ , м, то при расходе воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, равном его среднему значению в начале и конце участка, работа текущей воды в течение 1 с, т. е. мощность водотока на рассматриваемом участке может быть рассчитана по формуле:

$$N_{вод} = g_3 \cdot Q \cdot H \cdot \rho_{воды} = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \rho_{воды}, \quad (6.1)$$

где  $g_3 = 9,81$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $Q$  - расход воды через турбину, м<sup>3</sup>/с;  $H$  - падение участка водотока (напор), м;  $\rho_{воды}$  - плотность воды, принимается равной 1000 кг/м<sup>3</sup>.

*Энергия морей и океанов.* Энергия Мирового океана включает в себя энергию ветровых волн, океанических течений, приливов, прибоев, градиентов солености и теплоты. Наиболее перспективными из них для электроэнергетики считаются приливная, волновая, тепловая энергия и энергия течения.

*Приливная энергия.* Взаимодействие космических сил системы Земля - Луна - Солнце приводит в движение огромные массы воды в Мировом океане. В результате в одних местах Земли через каждые 12 ч. 25 мин., а в других через 24 ч. 50 мин. волна прилива наступает на берег и плавно повышает около него уровень воды. Высота этого подъема в зависимости от взаиморасположения указанных космических тел, формы береговой линии и некоторых других топографических факторов колеблется от нескольких сантиметров до многих метров. Наибольшая амплитуда колебаний приливо-отливных уровней наблюдается в то время, когда центры тяжести Земли, Луны и Солнца находятся на одной прямой (период сизигии). В этом случае прилив с максимальной высотой называется сизигийным. Если эти тела образуют прямоугольный треугольник, то высота прилива будет минимальной (период квадратуры), соответственно прилив с минимальной высотой называется квадратурным.

Средняя потенциальная мощность за приливный период составляет:

$$N_{\text{прил}} = \frac{\rho_{\text{воды}} \cdot g_z \cdot H^2 \cdot A}{2 \cdot \tau}, \quad (6.2)$$

где  $H$  - высота прилива, м;  $A$  - площадь бассейна, м<sup>2</sup>;  $\tau$  - период естественного прилива (для полусуточного составляет 12 ч. 25 мин.), с;  $g_z = 9,81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{воды}}$  - плотность воды, принимается равной 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Мировые энергетические ресурсы приливной энергии оценивают в 1 млрд. кВт. Однако использование этой энергии затрудняется из-за ее пульсирующего прерывистого характера, который является следствием самого принципа использования приливной энергии с помощью приливных электростанций (ПЭС).

*Энергия волн морей и океанов.* Мощность ветровых волн Мирового океана оценивается по разным источникам в размере от 10 до 90 млрд. кВт. Однако мощность, которая может быть полезно использована, значительно ниже - всего 2,7 млрд. кВт, т. е. примерно равна суммарной мощности всех электростанций мира.

Ветровые волны являются следствием проявления солнечного излучения, поскольку последнее служит причиной глобальных перепадов давления в различных точках Земли. Эффективность поглощения солнечной радиации водными массами выше, чем земной поверхностью, поэтому воздух над ними нагревается сильнее и поднимается вверх, вытесняя более тяжелый холодный воздух вниз. Так образуются воздушные течения, направленные вертикально. В атмосфере происходит также общая циркуляция воздуха. Теплый воздух над экваториальными водами поднимается и опускается и движется в обратном направлении к экватору. На общий характер циркуляции влияют форма земной поверхности и вращение Земли.

Водным массам от движущихся воздушных масс энергия передается за счет трения на границе их раздела, которое тем больше, чем больше

взволнована поверхность воды. Параметрами волн, которые можно измерить непосредственно, являются высота и период. Эти параметры могут быть определены волнографом или в некоторых случаях оценены визуально.

Человечество уже более 180 лет стремится использовать энергию волн. Первый в мире патент на способ использования энергии волн был выдан в 1799 г. отцу и сыну Жерар из Парижа. До 1980 г. в 20 странах мира было зарегистрировано около 1000 различных предложений по использованию энергии волн и почти половина из них датирована в период с 1974 по 1981 г. При волновом волнении массы воды в гребнях волн находятся выше впадины волны, поэтому они обладают потенциальной энергией. Полная энергия волны, согласно линейной теории волн, складывается из потенциальной и кинетической энергий [Вис02]:

$$E = E_n + E_k = \frac{\rho_{\text{воды}} \cdot g_z \cdot H^2 \cdot \lambda \cdot b}{8}, \quad (6.3)$$

где  $H$  - высота волны, м;  $\lambda$  - длина волны, м;  $b$  - ширина фронта волны, м;  $g_z = 9,81$  м/с<sup>2</sup>; - ускорение свободного падения;  $\rho_{\text{воды}}$  - плотность воды, принимается равной 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Для преобразования энергии волн в электрическую энергию используются семь волновых эффектов:

- Периодическое изменение уровня воды в точке относительно стабилизированного тела;
- Разность фаз колебаний уровня воды в пространственно разнесенных точках;
- Разность фаз колебаний гидростатического давления в пространственно разнесенных точках;
- Разность фаз колебаний суммарного давления воды в пространственно разнесенных точках;
- Наклоны волновой поверхности;
- Концентрация волновой энергии по фронту или по глубине;
- Комбинации различных эффектов.

## 6.2 Гидроэнергетические установки и их типы

Гидроэнергетические установки это совокупность компонентов, связанных между собой и служащих для преобразования энергии (кинетической и потенциальной) в электрическую или наоборот.

В состав ГЭУ входят гидротехнические сооружения, основное и вспомогательное оборудование, которые позволяют осуществить промышленное использование гидроэнергетического потенциала данного участка водотока, а также приливную или волновую энергию морей и океанов.

В зависимости от способа преобразования и использования гидравлической энергии различают следующие основные типы ГЭУ:

- гидроэлектростанции (ГЭС);
- насосные станции (НС);

- гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС);
- приливные электростанции (ПЭС);
- волновые гидроэлектростанции (ВГЭС);
- малые ГЭС (МГЭС).

Несколько ГЭУ одного или разных типов могут объединяться в каскад.

*Гидроэлектрическая станция* – это гидроэнергетическая установка, включающая в себя плотину, которая перегораживает реку и создает подъем уровня воды, и здание станции, в котором размещаются гидравлические турбины, генераторы и другое электрическое и механическое оборудование. На ГЭС вода под действием силы тяжести движется из верхнего бьефа в нижний и вращает рабочее колесо турбины, которое связано с генератором валом. Генератор в свою очередь механическую энергию вращения превращает в электрическую энергию. Если частота вращения генератора недостаточна для выработки электроэнергии с параметрами сети (обычно 50 Гц), то рабочее колесо турбины связывают с генератором через редуктор. Редуктор обеспечивает увеличение частоты вращения генератора, тем самым уменьшаются не только размеры и масса генератора, за счет меньшего количества пар полюсов, а, как очевидно, и стоимость.

Мощность  $N_{гэс}$  (Вт) гидроэлектростанции вычисляется по следующей формуле:

$$N_{гэс} = g_3 \cdot Q_{гэс} \cdot H_{гэс} \cdot \rho_{воды} \cdot \eta_{гэс}, \quad (6.4)$$

где  $g_3 = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения;  $Q_{гэс}$  - расход воды через турбину,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H_{гэс}$  - напор, разница уровней верхнего и нижнего бьефом, м;  $\rho_{воды}$  - плотность воды, принимается равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\eta_{гэс}$  - общий КПД гидроэлектростанции.

Как видно из формулы (6.4), решающую роль для мощности гидроэлектростанции играют расход и напор. Расход и напор регулируются с помощью запаса воды, заранее накопленной в верхнем бьефе. Чем больше воды в водохранилище, тем выше уровень верхнего бьефа, а соответственно и напор.

Как видно из табл. 6.3, самая крупная гидроэлектростанция в КР – Токтогульская, которая входит в состав Нарынского каскада гидроэлектростанций, также как и Курпсайская и др. ГЭС (рис.6.3) [ПРГ07].

В табл.6.3 приведены крупнейшие гидроэлектростанции в Кыргызстане и их параметры (не полный список) [Омо02].

Табл.6.3

Крупнейшие ГЭС

Наименование показателей	Единицы измерения	Токтогульская ГЭС	Курпсайская ГЭС	Ташкумырская ГЭС	Шамалдысайская ГЭС	Учкурганская ГЭС	Атбашинская ГЭС	Камбар-Ата1 (строится)	Камбар-Ата2 (строится)	
Установленная мощность	МВт	1200	800	450	240	180	40	1900	360	
Годовая выработка электроэнергии (среднеголетняя)		4100	2630	1555	902	820	150	5114	1148	
Среднеголетний бытовой расход		359	391	439	438	429	32,8	317	317	
Характерные уровни водохранилища НПУ УМО		900	724	628	572	539,5	1904	1190	955	
		837	721,6	626,5	569,9	536,5	1888	1098	952,5	
Характерные напоры:	Максимальный	180	106	58,5	31	36	74	235	54,8	
	Минимальный		110	90,5	40	25,2	18,5	62,3	136,8	45
	Расчетный		140	91,5	53	26	29	70,4	166,5	47,5
Площадь зеркала водохранилища при НПУ		284,3	12	7,8	2,4	4,0	1,0	56	3,3	
Полный объем водохранилища НПУ		19500	370	140	39,4	52,5	9,6	4650	70	
Полезный объем водохранилища		14000	35	10	5,42	20,9	6,5	3430	8	
Тип плотины		Гравитационно-бетонная			Грун	Бет.-земл.	Грун тов.	Взрыво-набросная		
Высота плотины		215	113	75	37	56	79	275	60	
Длина плотины по гребню		292,5	360	336,5	250		55	280	190	
Характер регулирования		Многолетнее	Недельное			Суточное	Недельное		Сезонное	
Число турбин		4	4	3	3	4	4	4	3	
Расчетный расход на одну турбину		PO170/865-B-535	PO115 В-515,6	PO75/3123 В-620	ПЛ140/567 а-В-680					
Максимальный расход через турбину		960	972	957	1035	760	70,4	1000	840	
Удельный расход воды на 1 кВт час при Нрасх.		2,95	4,4	7,7	15,6	14,0	8,85	6,3	2,45	
Расход через водопропускные сооружения при НПУ всего:		3500	2537	3293	3090	3250				



Рис.6.3 Схема расположения существующих и перспективных ГЭС Кыргызской Республики

Источник гидроэнергетического потенциала, используемого на ГЭС, - крупные и средние реки, крупные ирригационные системы и системы водоснабжения, склоновый сток ледников и вечных снегов. ГЭС в основном отличаются друг от друга способом создания напора, степенью регулирования стока, типом установленного основного оборудования, комплексностью использования водотока (одно- или многоцелевое назначение) и т.д.

По способу создания напора ГЭС различают три основные схемы: *плотинная, деривационная и плотинно-деривационная*. Во всех схемах обязательно наличие плотины. Водное пространство, образованное плотиной и имеющее более высокие отметки своей поверхности по отношению к естественному состоянию реки, называется верхним бьефом (ВБ); водное пространство за плотиной вниз по течению реки - нижним бьефом (НБ).

Плотинная схема реализуется главным образом на равнинных реках с малыми гидравлическими уклонами. Напор, или разница уровней верхнего и нижнего бьефов, создается за счет сооружения плотины. При этом отметки водохранилища всегда выше естественного состояния реки.

Различают следующие характерные значения уровней верхнего бьефа (ВБ) - УМО, НПУ и ФПУ:

УМО - уровень мертвого объема или минимально допустимый уровень верхнего бьефа по условиям нормального функционирования ГЭС;

НПУ - нормальный подпорный уровень или уровень верхнего бьефа, при котором ГЭС работает с соблюдением заданных нормальных технических условий;

ФПУ - форсированный подпорный уровень или максимально допустимый уровень верхнего бьефа в экстремальных условиях. При наличии бытового притока воды в водохранилище в верхнем бьефе создается

кривая подпора, характеризующая дополнительное поднятие уровня воды в «хвостовой» части водохранилища.

По месту расположения здания ГЭС плотинные схемы разделяют на *русловые* и *приплотинные* (рис.6.4) [Мал85]. В русловой ГЭС, применяемой при напорах до 30 - 40 м, здания с установленным в нем основным оборудованием принимает участие в создании напора; в приплотинной - оно располагается за плотиной и участия в создании напора не принимает. В большинстве случаев здания приплотинных ГЭС расположены на поверхности земли, значительно реже - под землей. Вода к агрегатам подводится по относительно длинным напорным водоводам, как по индивидуальным, так и по общим. Для русловой схемы характерны малые расстояния от верхнего бьефа до гидротурбинной установки. Подвод воды к агрегатам здесь осуществляется по *индивидуальным водоводам*. На ГЭС, как правило, устанавливаются сороудерживающие сооружения (СУС) для защиты агрегатов от крупных плавающих предметов и мусора. Отвод воды от гидроагрегата осуществляется обычно с помощью *отсасывающей трубы* непосредственно в нижний бьеф. Иногда на ГЭС осуществляется холостой сброс воды в нижний бьеф через водослив, минуя гидроагрегаты.

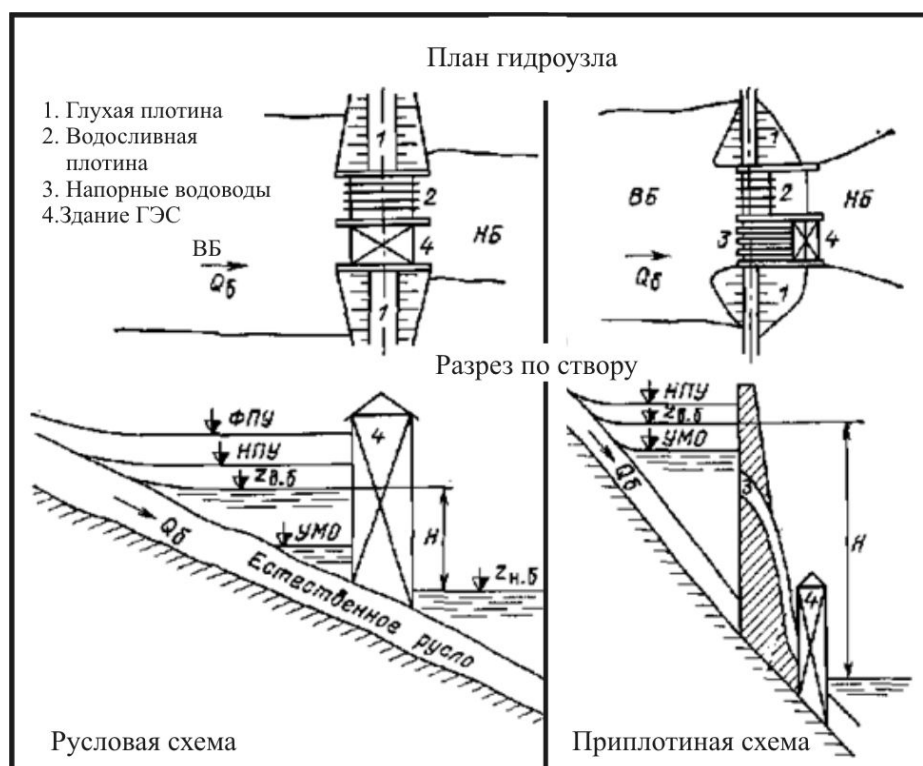


Рис.6.4 Плотинная схема (Русловая и приплотинная схемы) концентрации напора

*Русловыми низконапорными ГЭС* (напор до 20—30 м) являются такие гидроэлектростанции как Иркутская, Новосибирская и др. Примеры *приплотинных ГЭС*: Братская, Устьилимская, Красноярская, Саяношущенская, которая недавно была введена снова в эксплуатацию после



катастрофы 2009 года. Диапазон напоров на *приплотинных* ГЭС - от 35 до 300 м.

Плотинные схемы, как правило, имеют водохранилища, предназначенные для перераспределения бытового стока реки во времени. Значительно реже эти ГЭС работают по водотоку при постоянном НПУ. Основные виды турбин, устанавливаемых на русловых ГЭС, - горизонтальные и вертикальные агрегаты с пропеллерными, поворотн-лопастными и реже - радиально-осевыми турбинами; на приплотинных ГЭС устанавливаются обычно радиально-осевые и диагональные агрегаты.

*Деривационная* схема реализуется главным образом на реках с большими уклонами в горных и предгорных районах (рис. 6.5) [Мал85].. Напор ГЭС создается за счет использования естественного перепада уровней водотока. Состав основных сооружений здесь значительно отличается от состава их в плотинной схеме. Плотина головного сооружения предназначена лишь для организации отбора воды через водозаборные сооружения в деривацию. Деривация может быть безнапорной (в виде каналов или лотков) или напорной (в виде трубопроводов), а также смешанного типа.

Открытая деривация бывает саморегулирующаяся и несаморегулирующаяся. В первом случае берега канала горизонтальны по всей его длине. Это позволяет регулировать режим расходов в канале вплоть до полной остановки ГЭС с помощью изменения открытия направляющего аппарата или площади сопла в ковшовой турбине. Саморегулирующаяся деривация требует значительных земляных работ и характеризуется малой длиной деривации. В противном случае принимается несаморегулирующаяся деривация с одинаковым уклоном канала и его берм. Регулирование мощности ГЭС здесь в основном осуществляется за счет маневрирования затворами на водозаборном сооружении головного узла. При значительной длине деривации и времени добега от головного узла к ГЭС требуется создание сложной системы автоматического регулирования мощности. При быстром сбросе нагрузки на таких ГЭС возможны холостые сбросы воды через специальные сооружения в напорном бассейне ГЭС (рис. 6.5). Иногда в конце деривационного канала сооружают бассейн суточного регулирования (БС).

Вода от головного узла через деривацию, распределительное сооружение (иногда напорный бассейн) и турбинные водоводы подается к агрегатам ГЭС и сбрасывается в нижний бьеф в створе реки, удаленном от головного сооружения, в то время как в плотинной схеме забор воды в верхнем бьефе и сброс ее в нижний осуществляются практически в одном створе.

Гидравлическая схема напорных турбинных водоводов может быть блочной или неблочной. Деривация, как правило, бывает односточной. Для защиты напорных водоводов от разрушения при гидравлическом ударе на них сооружаются уравнивательные резервуары. Отвод воды от здания ГЭС может осуществляться или непосредственно в нижний бьеф, или с помощью

отводящей деривации - безнапорной или напорной. В последнем случае также возможна установка уравнильных резервуаров.

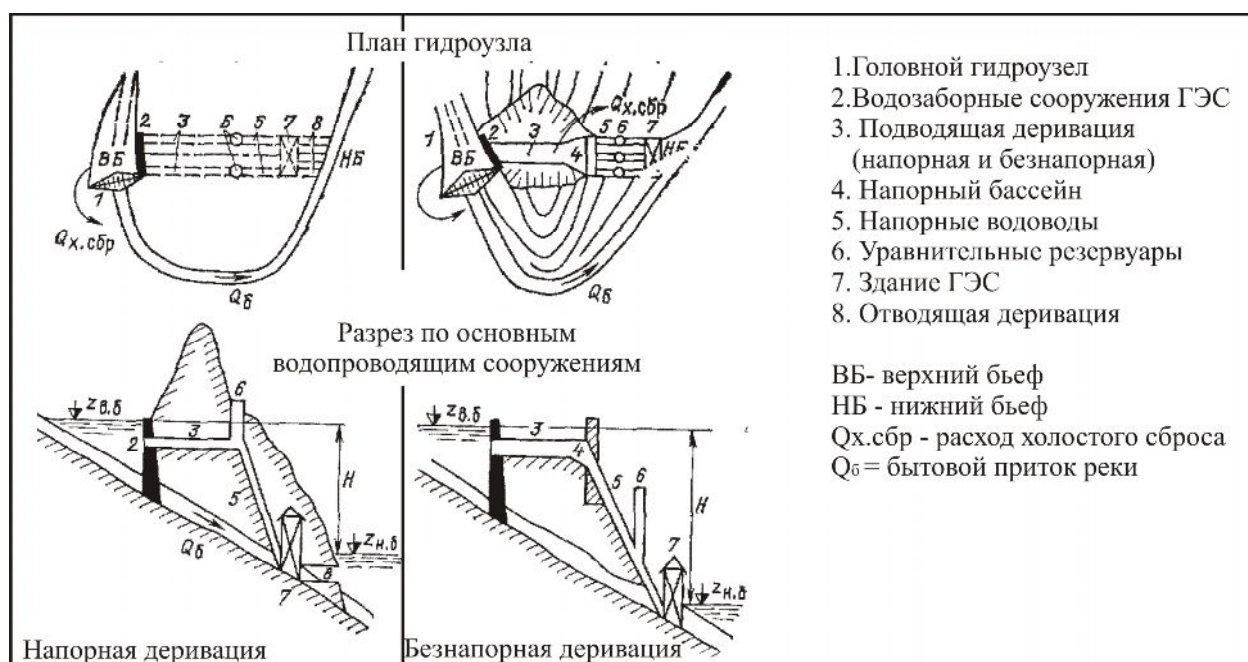
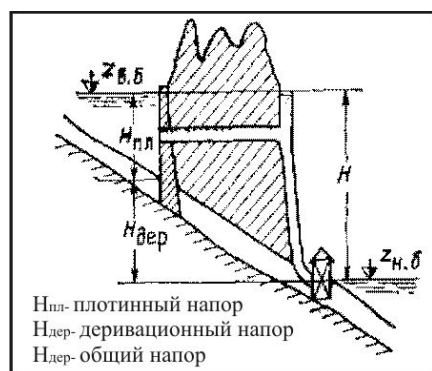


Рис.6.5 Деривационная (напорная и безнапорная) схема концентрации напора

Здание деривационных ГЭС может быть наземного, полуподземного и подземного типов. Деривационные ГЭС расположены в горных районах в Австрии, Швейцарии, Италии и других странах. Максимальный напор на этих ГЭС достигает 1500 м и более. Деривационные ГЭС в основном предназначены для краткосрочного регулирования речного стока или для работы по водотoku. Эти ГЭС, как правило, одноцелевого энергетического назначения. Основные виды турбин деривационных ГЭС - радиально-осевые и ковшовые. Отличительной особенностью режимов деривационных ГЭС является, как правило, незначительный диапазон колебаний уровней верхнего и нижнего бьефов.

*Смешанные, или плотинно-деривационные схемы.* Для этих схем доли



напора, создаваемого за счет деривации  $H_{дер}$  и плотины головного узла  $H_{пл}$ , соизмеримы (рис. 6.6) [Мал85]. Наличие плотины и значительного водохранилища позволяет осуществлять на этих ГЭС как краткосрочное, так и длительное регулирование стока. Характеристики и показатели плотинно-деривационных и деривационных ГЭС.

Рис.6.6 Смешанная схема концентрации напора

*Насосная станция* - это гидроэнергетическая установка, предназначенная для перекачки воды с низких отметок на высокие и для перемещения воды в удаленные пункты.

На насосных станциях используются насосные агрегаты, у которых на одном валу находится насос и электрический двигатель. Насосная станция является потребителем электрической энергии, которая преобразуется в полезную энергию для перекачки воды. Насосные станции применяются в основном для коммунально-бытового и промышленного водоснабжения, для водоснабжения тепловых электростанций, в ирригационных системах для подачи воды на поля, расположенные на высоких отметках или в удаленных районах.

*Гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС)* - это гидроэнергетическая установка, совмещающая работу гидроэлектростанции и насосной станции. В часы пониженных нагрузок энергосистемы, например, в ночное время, ГАЭС работает в режиме насосной станции, то есть, потребляя электрическую энергию, перекачивает воду из нижнего бассейна в верхний, тем самым, запасая энергию. Днем и в пики электропотребления запасенная вода из верхнего бассейна пропускается через турбину в нижний бассейн, выдавая электрическую энергию в сеть. В остальное время ГАЭС работает в режиме синхронного компенсатора с целью оптимизации показателя в электрических сетях  $\cos\varphi$  системы, регулирования напряжения, снижения потерь энергии. Имеются ГАЭС не только с суточным, но и с недельным и даже с сезонным аккумулярованием энергии. Вследствие потерь ГАЭС отдает в систему около 70-75% электрической энергии, получаемой ею из системы. Тем не менее, эти станции выгодны, так как они потребляют более дешевую, а иногда и «бросовую» электроэнергию в ночные часы, в период малой нагрузки системы, а отдают более дорогую энергию в часы пик нагрузки. Заполняя ночные провалы и снимая утренние и вечерние пики электрической нагрузки системы, ГАЭС существенно улучшают технические условия работы ТЭС, позволяют уменьшить их удельный расход топлива на 1 кВт·ч выработки электрической энергии, и в конечном итоге, дают экономию топлива в системе. Другое преимущество работы ГАЭС имеет значение для стран использующих тарификацию электроэнергии в зависимости от времени суток. Зачастую для сглаживания мощностей нагрузки, тарифы на электроэнергию в ночное время устанавливаются дешевле, чем в дневное время. Тем самым, хотя ГАЭС отдает в энергетическом эквиваленте всего лишь 70-75 % от потраченной электроэнергии, в денежном эквиваленте может быть получен и доход.

*Приливные электростанции (ПЭС)* - используют приливные колебания уровня моря, которые обычно происходят два раза в сутки. В некоторых пунктах обжитых морских побережий приливные колебания достигают 8-10м. Наибольшая величина прилива - 19,6 м наблюдается в заливе Фанди (Канада).



Рис.6.7 Приливная электростанция

*Волновые гидроэлектростанции (ВГЭС)*, в отличие от других типов ГЭУ, не требуют наличия гидротехнических сооружений для концентрации напора. Волновые электростанции преобразовывают потенциальную и кинетическую энергию волн в кинетическую энергию пульсаций в данном месте моря (океана) и концентрируют эти пульсации в направленное усилие - вращение вала генератора. Рабочим телом в этой станции может быть как сама морская вода, так и воздух. Энергия волн может либо непосредственно преобразовываться в энергию вращения вала генератора с редуктором, либо служить основой для привода воздушной турбины. Примерами волновых электростанций можно выделить плот Кокерелля, качающаяся утка Солтера, пульсирующий столб Масуды и преобразователь Рассела (рис.6.8) [Мал85].

Плот Кокерелля представляет собой плавающий на поверхности воды понтон, состоящий из трех частей, шарнирно связанных друг с другом. Взаимное перемещение частей понтона вызывает сжатие рабочей жидкости в средней части плота, которая используется для вращения вала турбины. Расчеты показали, что плот Кокерелля размером 107x50 м способен обеспечить мощность 2 МВт. С целью повышения КПД преобразования энергии волн в электрическую, рабочая кромка плота должна располагаться строго перпендикулярно направлению движения волн. Сами плоты должны располагаться отдельно друг от друга на расстоянии, равном ширине плота. Качающаяся утка Солтера - проект, разработанный в Эдинбургском университете доктором Солтером. Техническое название такого преобразователя - *колеблющееся крыло*. Форма преобразователя обеспечивает максимальное извлечение мощности. Рабочей конструкцией является поплавок ("утка"), профиль которого рассчитан по законам гидродинамики. Каждый элемент этой волновой ГЭС состоит из опорных стенок с балластом и подвижного элемента, перемещающегося вокруг оси в соответствии с колебаниями уровня моря. Несколько «уток» Солтера соединяются между собой с помощью общего вала, имеющего одно направление вращения, что обеспечивается храповым механизмом. При

вращении приводятся в действие насосы внутри вала, заполненного предварительно подготовленной водой. Системой труб различного диаметра создается разность давления, приводящая в движение турбины, установленные между поплавками и поднятые над поверхностью моря. Вырабатываемая электроэнергия передается по подводному кабелю. Для более эффективного распределения нагрузок на валу следует устанавливать 20-30 поплавков. Утка Солтера, как и плот Кокерелля, обладает хорошими энергетическими характеристиками. Кроме того, ее КПД менее чувствителен к частоте волн.

В волновых установках с пневматическими преобразователями под действием волн воздушный поток периодически изменяет свое направление на обратное. Для этих условий и разработана *турбина Уэллса*, ротор которой обладает выпрямляющим действием, сохраняя неизменным направление своего вращения при смене направления воздушного потока, следовательно, поддерживается неизменным и направление вращения генератора. Турбина нашла широкое применение в различных волноэнергетических установках. Главное преимущество устройств на принципе водяного колеблющегося столба состоит в том, что скорость воздуха перед турбиной может быть значительно увеличена за счет уменьшения проходного сечения канала. Это позволяет сочетать медленное волновое движение с высокочастотным вращением турбины. Кроме того, здесь создается возможность удалить генерирующее устройство из зоны непосредственного воздействия соленой морской воды. Уже известны примеры коммерческого использования устройств на этом принципе - сигнальные буи, внедренные в Японии Масудой (*Пульсирующий столб Масуды*) и в Великобритании сотрудниками Королевского университета Белфаста. Более крупное и впервые включенное в энергосеть устройство построено в Тофтестоллене (Норвегия) фирмой Kvaerner Brug A/S.

*Пульсирующий столб Масуды* представляет собой устройство, напоминающее коробку, «пляшущую» на воде. Поднятие - опускание уровня моря приводит к появлению либо избыточного давления, либо разряжения в некоторой замкнутой полости. Вследствие этого приводится во вращение воздушная турбина и далее - генератор. КПД данной ВГЭС мало зависит от направления движения воды. Эффективность столба Масуды существенно зависит от частоты волн, достигая максимума в пределах 1,2 - 1,3 Гц. Волновые электростанции подобного типа планируется размещать на достаточно глубоких местах.

Плавающий атолл основан на аналогичном принципе действия. Он представляет полусферу, плавающую ниже уровня моря. В верхней части ее размещены воздушная турбина и генератор. Такое устройство диаметром 75 м и высотой 18 м способно развивать мощность 2МВт.

Преобразователь Рассела состоит из нескольких последовательно соединенных друг с другом коробкообразных устройств, расположенных в основном под уровнем моря. Смежные перегородки образуют резервуары с разными уровнями воды в них – высоким и низким. Заполнение водой и

опорожнение этих резервуаров происходит в соответствии с заданной программой работы клапанов и режимом поднятия - опускания уровня моря в данном месте. Вода из верхних резервуаров пропускается через турбины в нижние и используется для выработки энергии. Подобное устройство может быть жестко укреплено на дне моря, КПД подобной установки несколько ниже установок, рассмотренных выше.

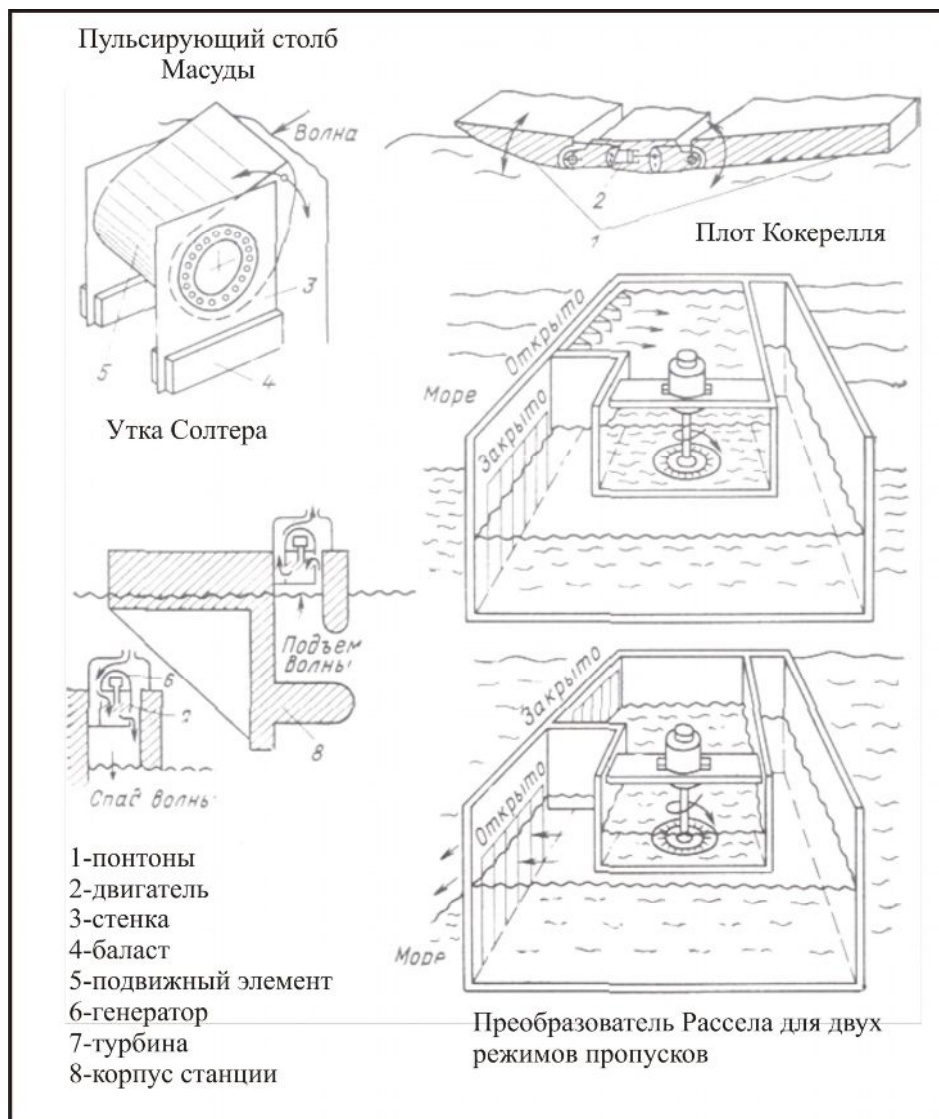


Рис.6.8. Некоторые схемы волновых электростанций.

Британский физик Франсис Фарли (Francis Farley) и Род Рейни (Rod Rainey) из компании Atkins Global изобрели новый тип волновой электростанции. В ней содержится минимум подвижных деталей, а главное - она обещает продемонстрировать высокую стойкость к агрессивному воздействию морской воды.





Рис.6.9

Экспериментальная установка «Анаконда»

Необычный генератор "Анаконда" (Anaconda) представляет собой огромную резиновую трубу, один конец которой прикреплен тросом к поплавку, заякоренному в свою очередь на дне океана, а второй - болтается свободно. Внутри трубы находится вода. "Змея" плавает на некоторой глубине (не мешая судам). Прохождение волн над установкой вызывает деформацию её оболочки, причём, по трубе пробегает волна утолщения в ту же сторону, в какую идут волны на поверхности моря.

Эта волна генерирует возвратно-поступательное перемещение воды внутри трубы, которое и приводит в действие турбины, расположенные в "хвосте змеи".

*Малые ГЭС (МГЭС).* По существующей классификации к малым относятся ГЭС мощностью до 10-15 МВт, в том числе:

- малые ГЭС - от 1 до 10 МВт.
- мини-ГЭС - от 0,1 до 1 МВт.
- микро-ГЭС - мощностью до 0,1 МВт.

По оценкам специалистов, суммарные гидроэнергетические возможности освоения малых рек и водотоков (с расходами воды от 0,3 до 50 м<sup>3</sup>/с) в КР могут составлять электровыработку порядка 5-8 млрд.кВтч в год [Омо02]. Малые ГЭС играют особенно важную роль в электроснабжении автономных потребителей, рассредоточенных вдали от линий электропередачи. Так как в Кыргызстане много малых рек и водотоков, малые ГЭС могут стать хорошей альтернативой в обеспечении электрической энергией недоступных автономных потребителей. В табл.6.4 представлены перечень малых ГЭС в Кыргызской Республике, рекомендуемых к восстановлению [Омо02].

Табл.6.4

Список малых ГЭС, рекомендуемых к восстановлению

Наименование	Установленная мощность, МВт	Среднегодовая выработка, млн.кВтч
1	2	3
Таласская область		
Ленинпольская ГЭС	1,16	5,6
Таласская ГЭС	0,15	0,65
Кырк-Казыкская ГЭС	0,74	2,0
Грозненская ГЭС	0,2	0,87
Ошская, Жалалабадская, Баткенская области		
ГЭС «Суфи-Курган»	0,69	3,0
Чоналайская ГЭС	0,125	0,54

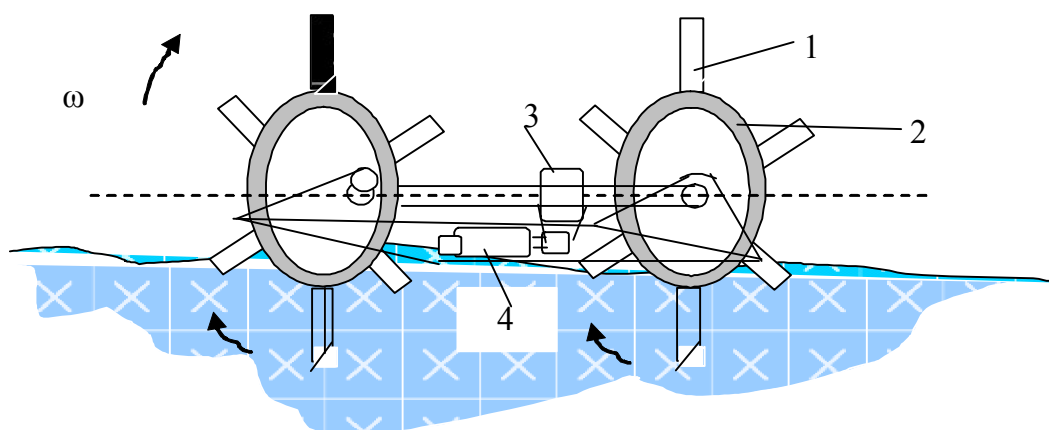
Продолжение табл.6.4

1	2	3
ГЭС «Гульча»	0,66	2,87
Акжарская ГЭС	0,125	0,54
Атамкульская ГЭС	0,25	1,09
Узгенская ГЭС	0,23	1,0
ГЭС «Правда»	0,44	1,91
ГЭС «Муян»	1,5	6,52
ГЭС-4 г.Ош	1,5	6,52
ГЭС-5 г.Ош	1,5	6,52
ГЭС им. Федорова	0,086	0,37
Кыргызатинская ГЭС	0,1	0,435
ГЭС им. Чапаева	0,086	0,37
ГЭС Ян-2	0,185	0,8
Араванская ГЭС	0,544	2,36
ГЭС «Фрунзе»	1,2	5,22
Базаркурганская ГЭС	0,17	0,74
Первомайская ГЭС	0,44	1,91
Майлуусуйская ГЭС	0,245	1,06
Октябрьская ГЭС	0,44	1,91
ГЭС «Орто-Азия»	0,44	1,91
ГЭС «Алга»	0,2	0,87
ГЭС «Исфана»	0,8	3,48
Иссыкульская область		
ГЭС «Долинка»	0,221	0,96
Арасанская ГЭС	1,2	5,22
Джетиогузская ГЭС	0,15	0,65
Нарынская область		
Бешкаиндинская ГЭС	0,2	0,87
Абенгетынская ГЭС	0,36	1,56
Джумгальская ГЭС	0,56	2,43
Кочкорская ГЭС	0,8	3,48
ГЭС «Красная»	0,16	0,69
Онарчинская ГЭС	1,38	5,1
Чуйская область		
Сокулукская ГЭС-2	1,2	8,0
«Джарды-Каинда»	0,22	1,1
Иссыкатинская ГЭС	1,48	7,4

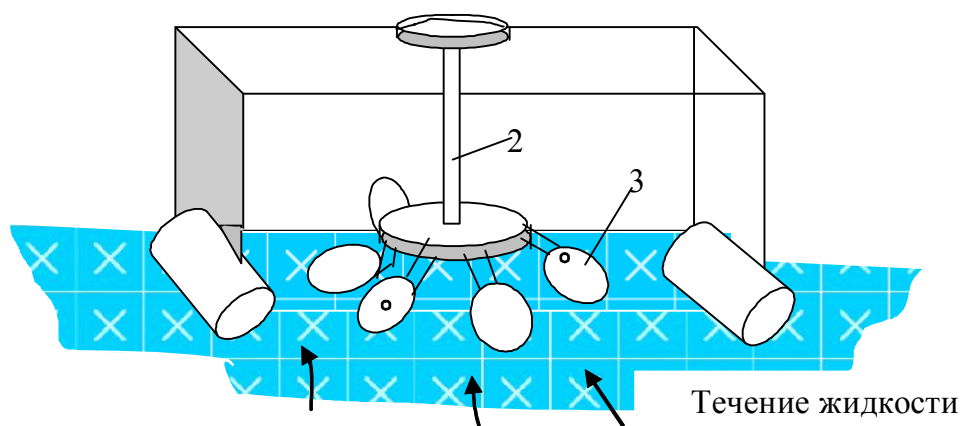
*Конструкции, использующие энергию малых водотоков.* Установка для использования текущей среды показана на рис. 6.10 а. Функционирует она следующим образом. При воздействии на вертикальные лопасти 1 текущей средой, возникает гидродинамическая сила, приводящая в движение балластные ободы. Через кинематическую связь 3 опора передает крутящий



момент на вал электрогенератора, при этом сам электрогенератор остается неподвижным. Данная гидроэнергетическая установка работает на равнинных водотоках, от размеров и энергии которых зависит ее мощность. Гидроэнергетическая установка (рис. 6.10 б.), двигаясь, использует энергию текучей среды посредством рабочего колеса 6.



а) Равнинная гидроустановка



б) Гидроэнергетическая установка.

Рис.6.10. Схемы работы равнинной гидроустановки

Рабочее колесо 1 содержит вал и расположенные на нем лопасти (рис. 6.10б). Установка смонтирована на раме 7, закрепленной на понтонах 6. Перпендикулярно наклоненные к направлению потока воды лопасти меняют свою ориентацию по направлению к потоку посредством колеса 4. Одна из лопаток выполнена составной из соединенных между собой внутренней и наружной частей, имеющих поперечный разъем, расположенный под углом к оси, и ослаблена эластичной прокладкой, размещенной между частями, и упругой связью. Упругая связь выполнена в виде пакета пластин, обращенных к потоку среды, имеющих переменную длину, уместающуюся в сторону от лопатки и контактирующих с ее наружной частью. Устройство ориентировано на равнинный водоток. Применяются электрогенерирующие машины может синхронного и асинхронного типов.

В гидроэнергетической установке, изображенной на рис. 6.11, поток жидкости регулирующим клапаном 1 попеременно отклоняется в камеры 2 и 3 и обратно.

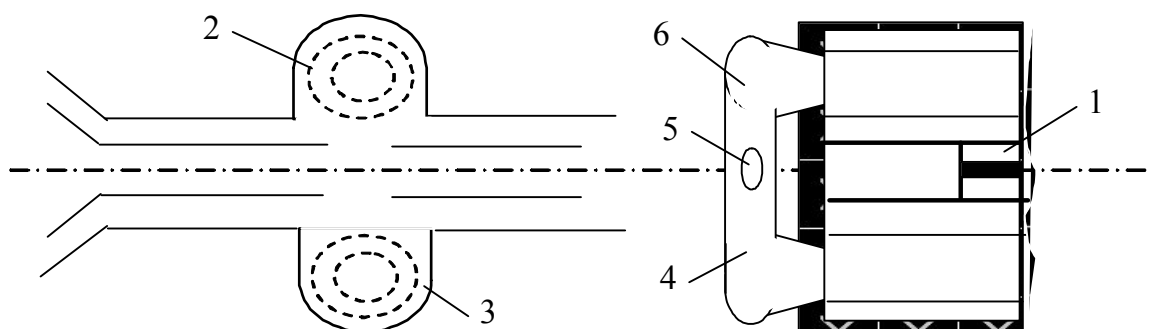


Рис. 6.11 Турбина в проточном тракте сифона

Вращательное движение жидкости в камерах вызывает колебания воздуха и его переток по трубопроводам 4 и 6 с приведением в действие турбины 5 и спаренного с ней генератора. В целях повышения эффективности работы всего устройства его устанавливают в проточном тракте сифона. Необходимые условия безотказной работы – чистая без крупных фракций протекающая жидкость. Для данной установки необходима сороудерживающая решетка.

Наплавная водяная турбина 16 кВт (рис. 6.12) предназначена для преобразования кинетической энергии потока в механическую, а затем в электрическую энергию. Турбина представляет собой протяженный круглый элемент из легкого (легче воды) материала с винтовыми ребрами на его поверхности. Элемент шарнирно закреплен с двух сторон тросами, передающими вращающий момент генератору.

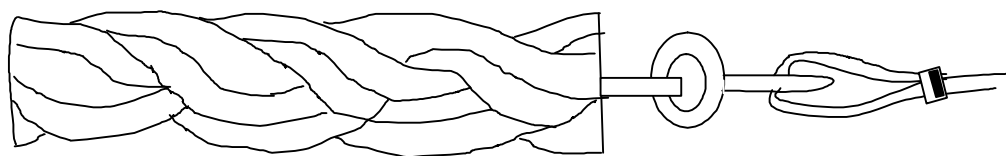


Рис. 6.12 Наплавная водяная турбина

Гидросиловая установка (рис. 6.13) предназначена для выработки электроэнергии минигенератором, который приводится во вращение бесконечным приводным ремнем 1 с расположенными на нем водяными ковшами 2. Ремень 1 с ковшами 2 смонтирован на раме 3, способной плавать на волнах. Рама 3 крепится к опоре 4, на которой расположен генератор 5. Ковши расположены на внешней стороне ремня с открытыми сторонами, обращенными к горизонтальному направлению течения воды. Число ковшей определяется из условия обеспечения вращения генератора. Возможен вариант использования устройства «лестничного» типа с прикрепленными лопастями.

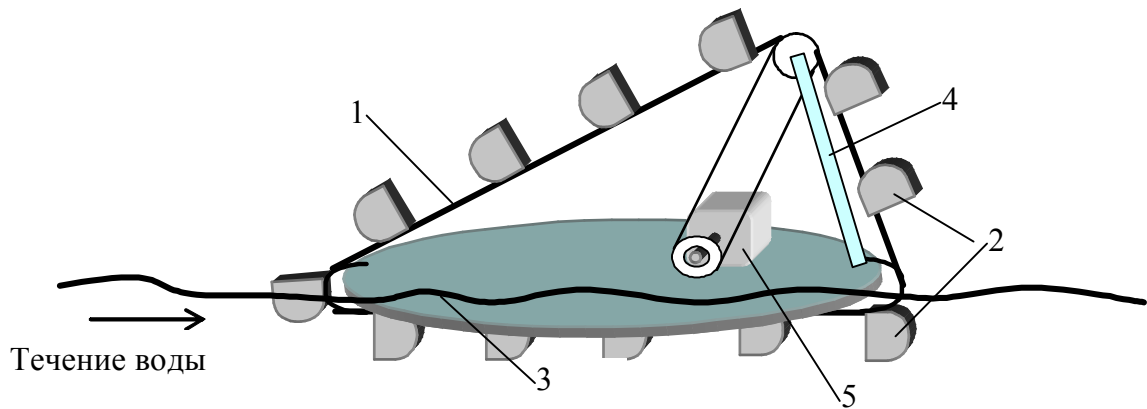


Рис. 6.13 Ременно-ковшевая установка

Устройство для использования кинетической энергии водотоков состоит из расположенных в воде на противоположных берегах вертикальных цилиндров, на которые надет шкив (рис. 6.14).

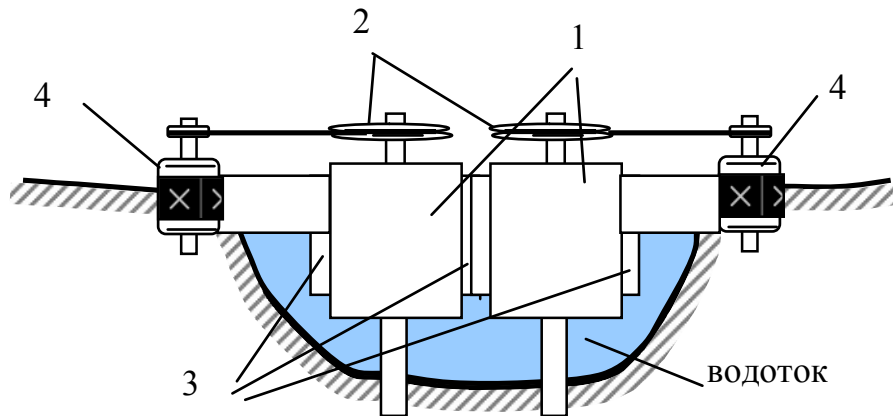


Рис. 6.14 Микроплотинная установка

Между верхними и нижними осями шкива установлены лопатки. За счет угла атаки между лопатками и вектором скорости, текущая вода приводит во вращение цилиндры, а через шкив - генератор, вырабатывающий электроэнергию.

Устройство для использования энергии водотоков состоит из рабочего колеса 1, вертикально расположенного в потоке воды, с шарнирно закрепленными лопатками 2 на верхнем 1 и нижнем 3 ободе (рис. 6.15). Верхний обод 1 соединен с генератором 4. Положение лопаток 2 регулируется самим потоком: перпендикулярно течению в прямоходе и параллельно движению против течения.

### Обод генератора

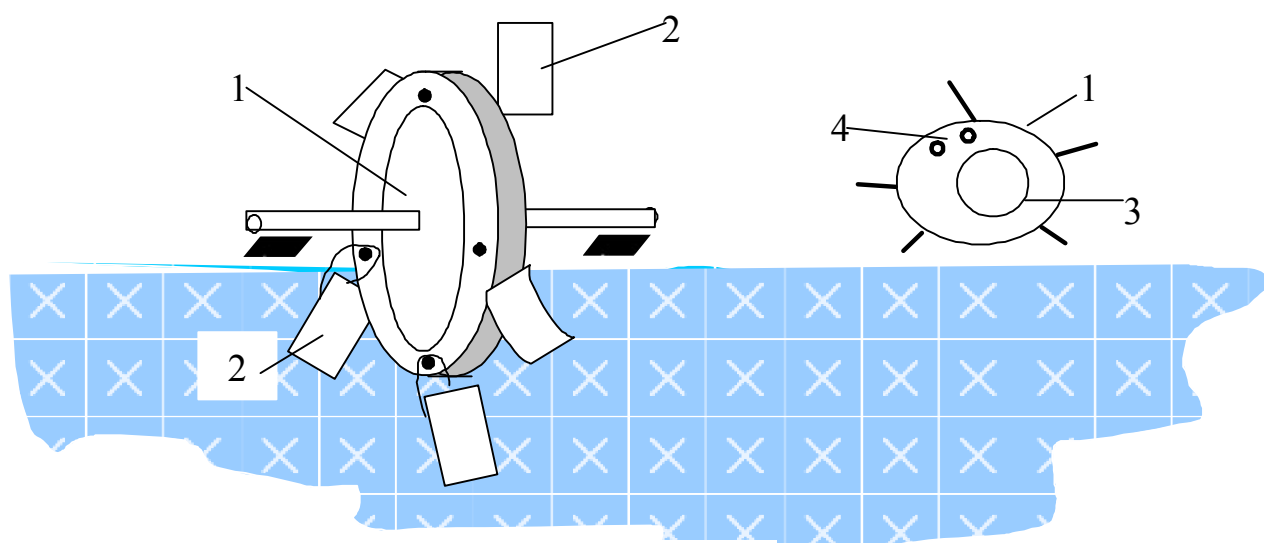


Рис. 6.15 Устройство, преобразующее энергию водотока

Рукавная микрогидроэлектростанция 1 кВт (МГЭС-1) состоит из турбины в виде беличьего колеса 1, направляющего аппарата 2, гибкого трубопровода 3 диаметром 150 мм, водозаборного устройства 4, генератора 5, блока управления 6 и станины 7 (рис. 6.16).

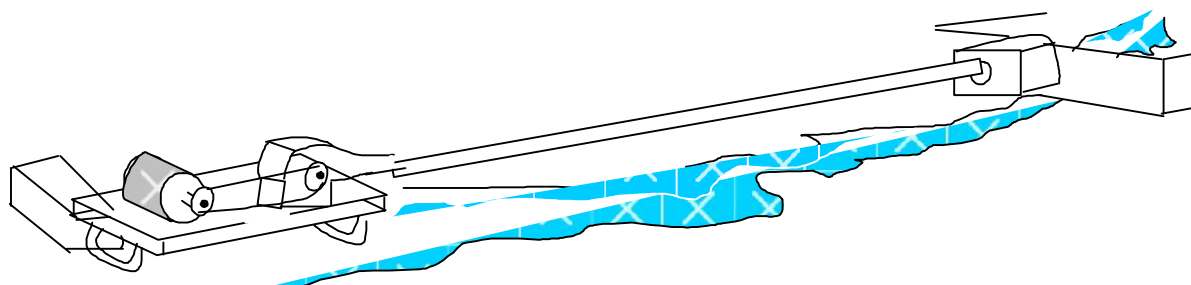


Рис. 6.16 Рукавная микро ГЭС 1 кВт

Работа данной МикроГЭС осуществляется следующим образом: водозаборное устройство 4 концентрирует гидравлическую среду и посредством трубопровода 3 обеспечивает перепад высоты между верхним уровнем воды и рабочей турбиной 1, взаимодействие определенного давления гидравлической жидкости с турбиной, приводит во вращение последнюю. Вращающийся момент турбины 1 передается электрогенератору.

Сифонная гидроэнергетическая установка (рис. 6.17) применяется там, где возникает перепад гидравлической жидкости на высотах от 1,75 м от плотины или в результате естественных условий /3/.

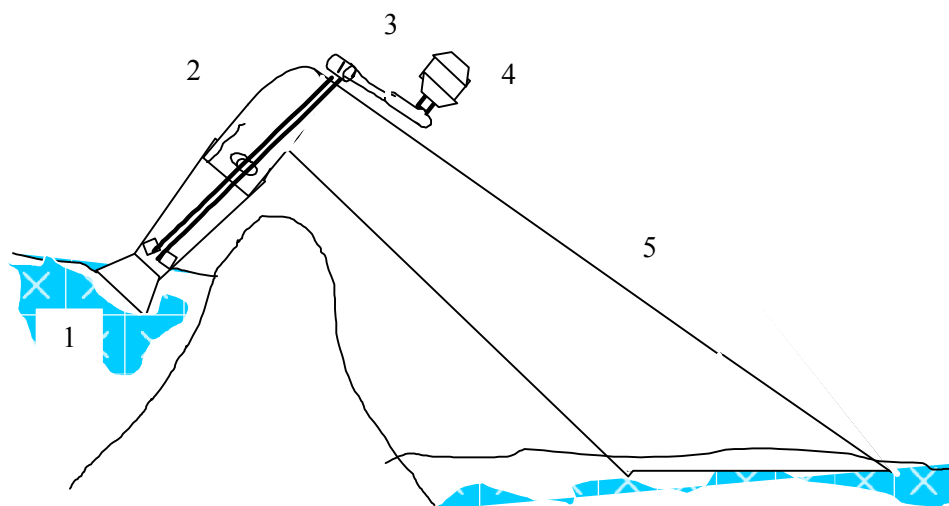


Рис. 6.17 Сифонная гидроустановка

Работа этих установок происходит следующим образом: проходящая гидравлическая жидкость через турбину 1 поднимается через гребень плотины, рис. 9, вращательный момент передается посредством вала 2 и ременную передачу 3 электрогенератору 4. Отработанная жидкая среда по расширяющему водоводу поступает в нижний бьеф.

Низконапорная микрогидроэлектрическая установка (рис. 6.18) работает с номинальным напором жидкого столба не менее  $H=1,5\text{ м}$ . При уменьшении перепада уменьшается выходная мощность. Рекомендованная высота перепада –  $1,4\div 1,6\text{ м}$ .

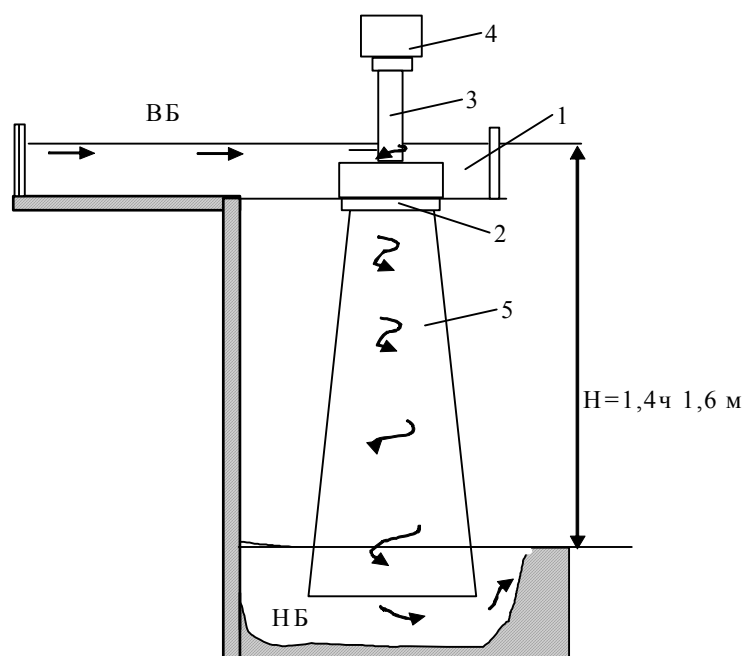


Рис. 6.18 Низконапорная гидроэлектростанция

Принцип работы основан на взаимодействии гидравлической жидкости, обладающей потенциальной энергией, преобразуемой во вращающуюся, а затем в электрическую форму. В заборном устройстве 1

текущая среда попадает в турбину 2, предварительно жидкость закручивается и, проникая в отводную трубу дополнительно за счет падающей жидкости, взаимодействует с лопастями турбины 2, кинетическую энергию жидкости преобразует во вращающийся момент вала 3, затем на электрогенератор. Вес низконапорной станции составляет 16 кг при мощности  $P = 200$  Вт.

Пропеллерный полупрямоточный гидроэнергопреобразователь состоит из напорного водовода 1, направляющей решетки 2, пропеллерной турбины 3, закругленного отводного канала 4, вала передачи момента 5 и электрогенератора 6 (рис. 6.19).

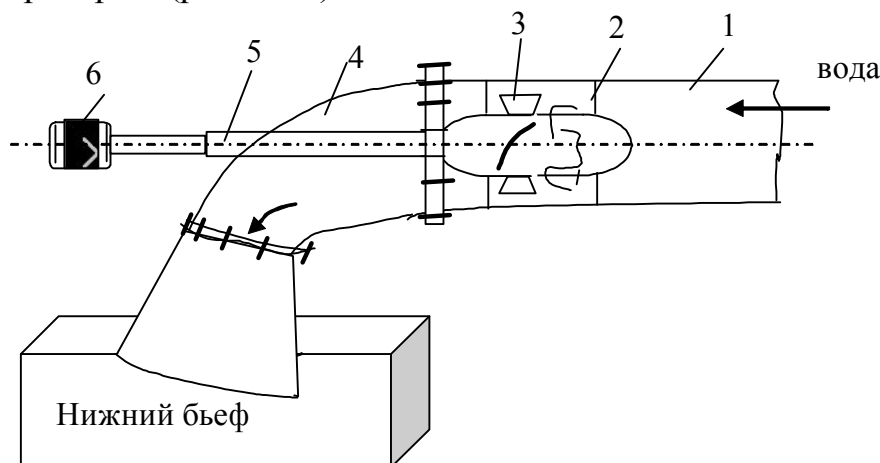


Рис. 6.19 Полупрямоточный преобразователь

Электрическая мощность данной конструкции лежит в пределах  $1 \div 10$  кВт при перепаде высоты  $H_M = 2,2 \div 5,7$  м. Расход воды  $Q_H = 0,05 \div 0,21 \text{ м}^3/\text{с}$ . Перепад высоты  $H_M = 2,2 \div 5,7$  м. Скорость вращения турбины составит  $\omega_n = 1000$  об/м.

Капсульный гидропреобразователь на базе электродвигателя 2ПЭДВ-22-219 (рис. 6.20) работает аналогично предыдущей гидроэнергоустановке при напоре  $H = 2,5 \div 6,3$  м и расходе воды  $Q = 0,005 \div 0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ . Электрическая мощность  $1 \div 5$  кВт. Диаметр водяных турбин от 0,2 до 0,254 м. Диаметр гидравлического колеса  $D_k = 0,35 \div 0,4$  м.

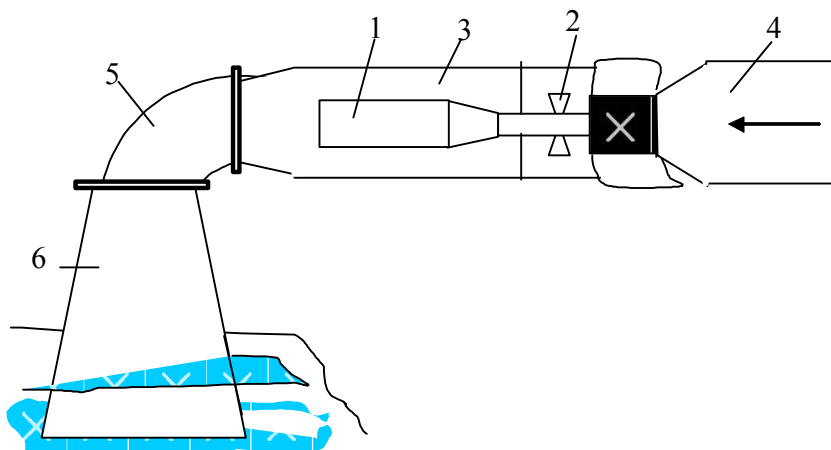


Рис. 6.20 Капсульная микроГЭС

Прямоточный гидропреобразователь (рис. 6.21) состоит из турбины пропеллерного типа 1, направляющей решетки 2, вала передачи момента 3, электрогенератора 4, отводящего трубопровода 5. Работает при помощи напорного трубопровода.

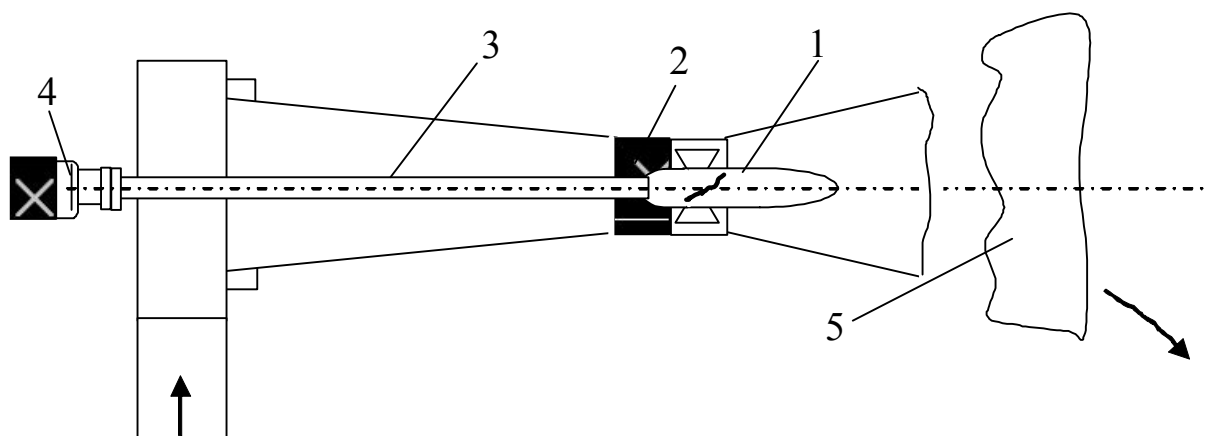


Рис. 6.21 Прямоточный гидропреобразователь

Гидропреобразующее устройство (рис. 6.22) предназначено для преобразования энергии быстродвижущейся жидкой среды в электрическую.

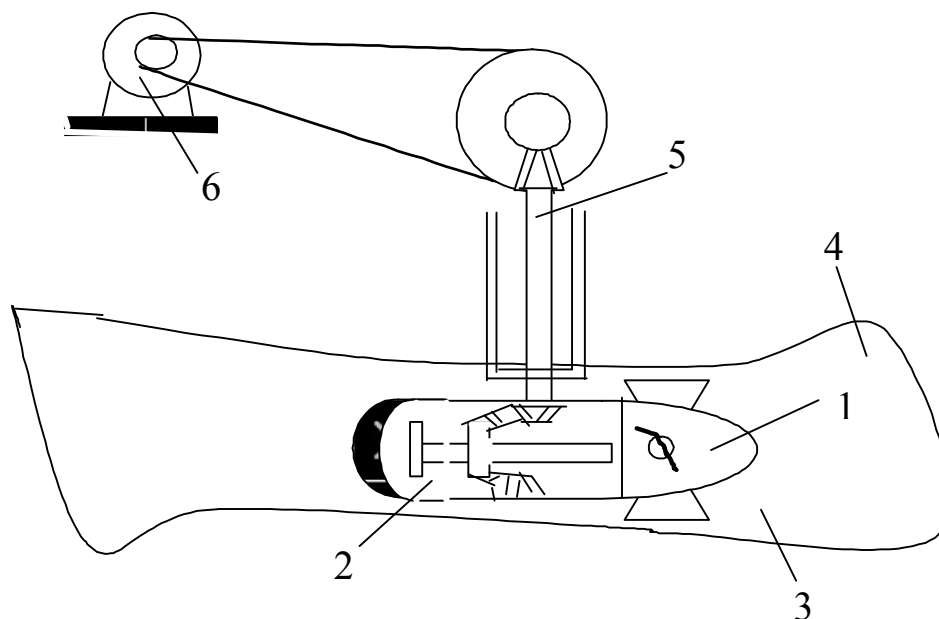


Рис. 6.22 Гидропреобразователь энергии быстрого водотока

Оно состоит из пропеллерной турбины 1, расположенной в капсуле 2, и устанавливается на водотоках, именуемых «быстротоками». Капсула расположена в направляющем аппарате 4, который устанавливают внутри текущей среды. Вращательный момент от турбины передается на вал 5, а затем электрогенератору 6.

Эскиз турбины с вращающимися лопатками, разработанной в Кыргызском НИИ энергетики, приведен на рис. 6.23. В данной установке лопатки (1) шарнирно соединены с двумя колесами (2), которые жестко закреплены на валу (3). Вал через подшипниковые узлы соединяется с рамой, с его выходного конца отбирается вырабатываемая мощность. С лопатками (1) жестко соединены водила (4), которые через роликовую связь соединены с пазовым кулачком (5). Пазовый кулачок имеет круговой паз, средний диаметр которого равен  $D_0$  (диаметр шарнирного крепления лопаток с колесами). Центр кулачка смещается относительно центра колес на величину меньшую длины водила, что позволяет вращать лопатки вокруг своего центра. Размеры смещения кулачка относительно колес и длина водила подбираются так, что соблюдаются следующие условия:

- лопатка безударно входит в водоток;
- лопатка в водотоке постоянно перпендикулярна ему;
- лопатки безударно выходит из водотока;
- разворот лопатки на  $360^{\circ}$  происходит над водотоком.

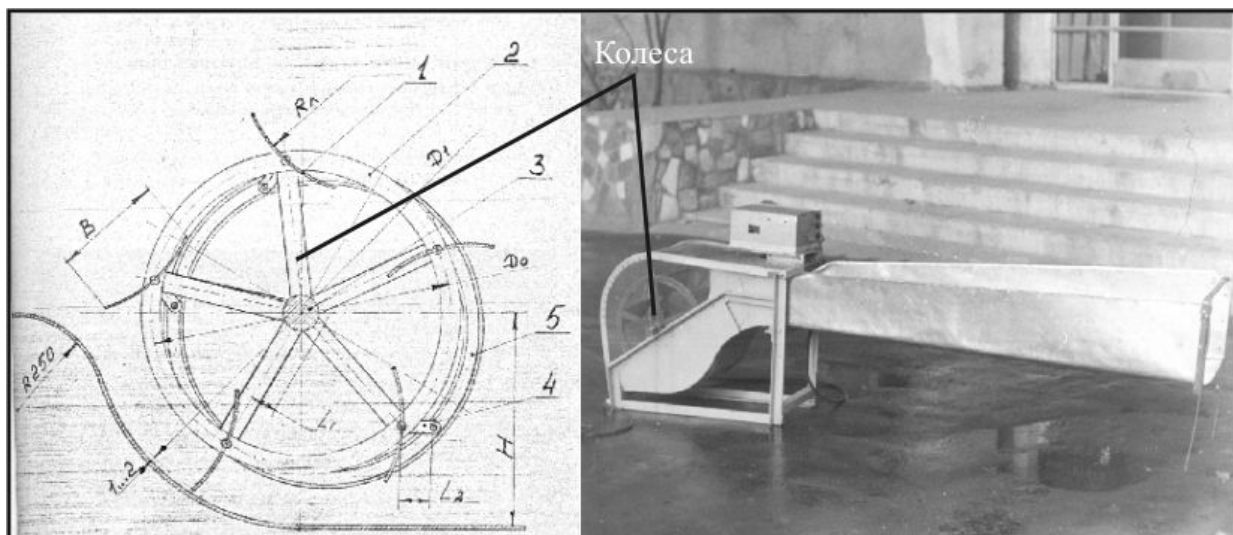


Рис. 6.23 Эскиз турбины и общий вид макетного образца безнапорной турбины со съемным лотком

МикроГЭС с водяным двигателем, которая была разработана в Ошском Государственном Техническом Университете (ОШТУ) (рис. 6.24), состоит из привода, передаточного механизма, генератора и механизма подъема и опускания корпуса привода. Привод выполнен в виде водяного колеса с лопастями, установленного на валу, который через передаточный механизм соединен с валом генератора.

В результате испытаний микроГЭС с водяным двигателем в период весеннего пропуска воды (глубина потока - 0,6 м) получены следующие данные:

- напряжение генератора - 12 В;
- номинальный ток - 55 А;
- номинальная мощность – 660 Вт.



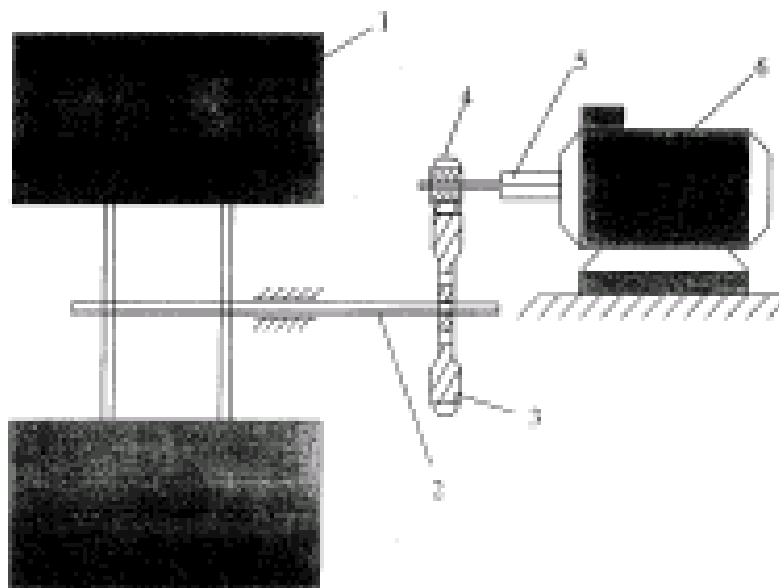


Рис. 6.24 Принципиальная схема микроГЭС, разработанная ОШТУ

*Ковшовая микроГЭС* (рис. 6.25). В данной микроГЭС установлен синхронный генератор типа ОС-51 У2ИМ1001, напряжение - 3-хфазное, частота - 50 Гц, полная мощность - 5 кВА, активная мощность - 4 кВт, КПД - 81,5%,  $\cos \varphi = 0,8$ , соединение обмотки статора - Y, номинальное напряжение - 230/380 В, частота вращения - 1500 об/мин, самовозбуждение, вес - 116 кг, шкив №1 диаметром 500 мм, шкив №2 диаметром 150 мм, шкив генератора диаметром 100 мм.

Рабочее колесо вращается в воздухе, и только часть лопастей в данный момент времени находится во взаимодействии с водой. Рабочее колесо ковшовых турбин может использовать только кинетическую энергию жидкости, т. е. перед входом на рабочее колесо вся ее энергия должна быть преобразована в кинетическую энергию. Рабочее колесо состоит из диска с рабочими лопастями, похожими по форме на ковши. Диаметр рабочего колеса  $D_1 = 1750$  мм, количество лопастей - 9. Частота вращения рабочего колеса на холостом ходу составляет 15 об/мин. При подключении нагрузки 500 Вт частота вращения составляет 13 об/мин.

Имеется небольшой водозабор для регулирования. Поток воды поступает на лопасти рабочего колеса по открытому каналу длиной 48 м.

Для увеличения числа оборотов предполагается: подводить воду по закрытому трубопроводу с увеличением наклона и расхода; каждую лопасть выполнить в виде двух криволинейных поверхностей, разделенных ножом; рабочее колесо установить таким образом, чтобы ножи совпадали с осью струи.

При натекании струи на лопасть, она делится ножом на две равные части и каждая обтекает криволинейную поверхность, за счет изменения как направления скорости воды, так и ее значения, создавая давление на лопасть и образуя момент рабочего колеса, вращающего его вместе с валом. Поскольку вода натекает на лопасти (ковши) с огромной скоростью, то

предъявляются очень высокие требования к точности и чистоте обработки их поверхности.



Рис.6.25 Общий вид ковшовой МикрогЭС

### 6.3 От водяного колеса к водяной турбине

Для КР крупные гидроэлектростанции и малые ГЭС являются наиболее перспективными гидроэнергетическими установками. Основным из компонентов гидроэлектростанций является *гидравлическая турбина (гидротурбина)*. Водяная турбина развилась из водяного колеса, и прежде чем говорить о ее устройстве, следует сказать несколько слов о водяных колесах. Первые водяные колеса стали использоваться еще в древности. По конструкции они делились на нижнебойные (или подливные) и верхнебойные (или наливные). Нижнебойные колеса были наиболее простым типом водяного двигателя. Они не требовали для себя строительства каналов или плотин, но в то же время имели самый низкий КПД, так как их работа основывалась на достаточно невыгодном принципе. Этот принцип заключался в том, что подтекающая под колеса вода ударяла в лопатки, заставляя их вращаться.

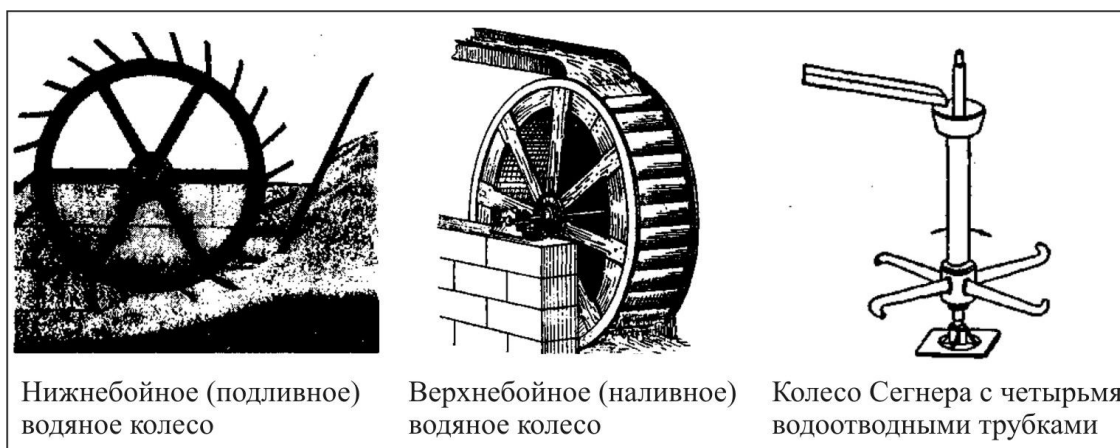


Рис. 6.26 Развитие водяных колес, вращающихся за счет воды

Таким образом, в подливных колесах использовалась только сила напора воды. Более рациональны с энергетической точки зрения были наливные колеса, в которых использовался еще и вес падающей воды. Устройство наливного колеса также было очень просто. Как видно из рис.6.26 [Рыж99], по ободу большого колеса или барабана приделывался ряд ковшей. Вода сверху из желоба наливалась в верхний ковш. Наполненный водой ковш становился тяжелее, опускался вниз и тянул за собой весь обод. Колесо начинало вращаться. На место опустившегося колеса становился следующий ковш. Он тоже наполнялся непрерывно текущей водой и начинал опускаться. На его место приходил третий, потом четвертый и так далее. Когда ковши доходили до нижней точки обода, вода из них выливалась. При прочих равных условиях мощность верхнебойных колес была выше, чем у нижнебойных, но зато эти колеса имели большие габариты и невысокую скорость вращения. Кроме того, для их эффективной работы требовалось создавать значительный перепад воды, то есть строить каналы, плотины и прочие дорогостоящие сооружения. Любое водяное колесо насаживалось на вал, который вращался вместе с колесом, а от него вращение передавалось дальше к той машине, которую хотели привести в действие. В древности и средневековье такие двигатели широко использовали в самых разных отраслях производства, где с их помощью приводили в движение молоты, воздуходувные мехи, насосы, ткацкие машины и другие механизмы.

В 1750 году венгр Сегнер, работавший в Геттингенском университете, выдвинул совершенно новую идею водяного двигателя, в котором, наряду с напором и весом, использовалась еще и сила реакции, создаваемая потоком воды. Устройство этого горизонтального колеса приведено на рисунке 6.26. Вода поступала сверху в сосуд, соединенный с осью, внизу которого располагались крестообразные трубки с загнутыми в одну сторону концами. Вода вытекала через них, и получавшаяся при этом сила реакции действовала во всех четырех трубках в одну и ту же сторону, приводя Колесо Сегнера с четырьмя водоотводными трубками  $\Sigma$  во вращение все колесо. Это была чрезвычайно остроумная находка, не получившая, впрочем, в этом виде никакого практического применения, но возбуждавшая к себе живейший интерес некоторых математиков и инженеров. Великий немецкий математик Эйлер одним из первых откликнулся на эту новинку, посвятив исследованию колеса Сегнера несколько своих работ. Прежде всего, Эйлер указал на недостатки в конструкции Сегнера, отметив при этом, что невысокий КПД колеса был следствием нерациональных потерь энергии. Далее он писал, что эти потери могут быть значительно снижены, если идея нового двигателя получит более полное воплощение. Значительные потери происходили, прежде всего, при входе воды в колесо из-за резкого изменения направления и скорости течения воды (энергия здесь расходовалась на удар). Но их можно было уменьшить, если подводить воду к колесу в направлении вращения со скоростью этого вращения. На выходе так же имелись потери, так как часть энергии уносилась с выходной скоростью воды. В идеале вода должна отдавать колесу всю свою скорость. Для этого Эйлер предлагал заменить

горизонтальные водовыпускные трубки трубками криволинейной формы, идущими сверху вниз. Тогда уже не было нужды делать отверстия для выпуска воды сбоку, так как можно было просто оставлять открытым нижний конец замкнутой трубки. Эйлер предсказал, что в будущем гидравлические машины этого нового типа (собственно, речь здесь шла о гидравлической турбине, но самого этого названия еще не было в употреблении) будут иметь две части: неподвижный направляющий аппарат, по прохождению через который вода будет поступать в нижнее вращающееся колесо, являющееся рабочим органом машины. Несмотря на высказанные замечания, Эйлер очень высоко оценил изобретение Сегнера и прозорливо указал, что тот открыл новый путь развития гидравлических двигателей, которому суждено большое будущее.

В первой четверти 19 века французский математик Понселе предложил особый вид подливных колес новой конструкции. КПД колеса Понселе достигал 70%, что было совершенно недостижимо для других типов водяных двигателей. Секрет успеха заключался в том, что лопаткам колеса была придана особая полукруглая форма, так что подводимая вода поступала на них в направлении их кривизны, проходила некоторое расстояние вверх по лопатке, а затем, опускаясь, выходила наружу. При таких условиях совершенно устранялся удар воды о лопатки при входе, на который обычно терялась значительная часть энергии водяной струи. Изобретение Понселе стало важным шагом на пути к водяной турбине. Для того, чтобы этот путь был пройден до конца, не доставало второго элемента турбины, описанного Эйлером - направляющего аппарата. Впервые направляющий аппарат к водяному колесу применил профессор Бюрден в 1827 году. Он же первый назвал свою машину турбиной (от латинского turbo - быстрое вращение), после чего это определение вошло в обиход. В 1832 году первую практически применимую гидротурбину создал французский инженер Фурнейрон (рис.6.27) [Рыж99].

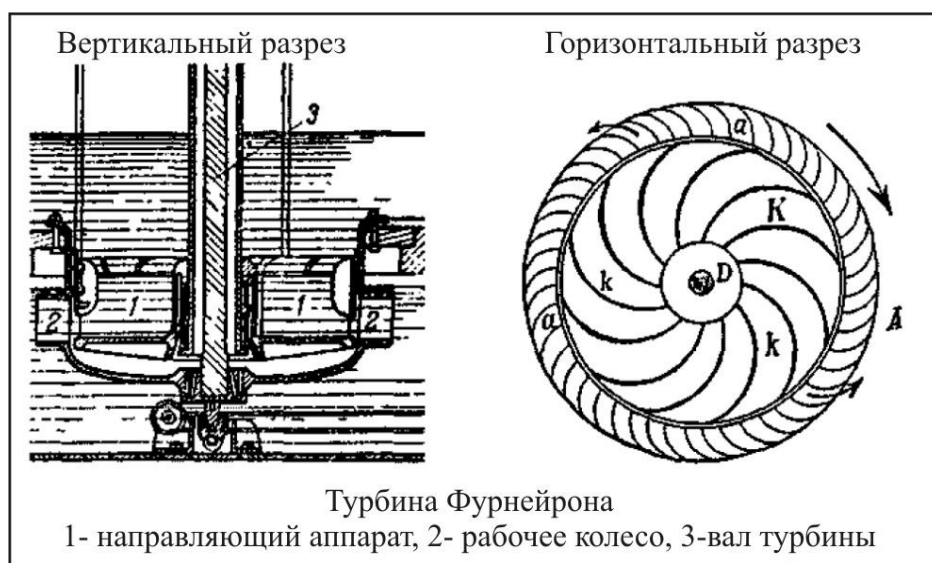


Рис.6.27 Турбина Фурнейрона

Его турбина состояла из двух концентрических, лежащих друг против друга колес: внутреннего, неподвижного колеса, представлявшего из себя направляющий аппарат, и внешнего с изогнутыми лопатками  $a$ , которое и было рабочим турбинным колесом. Вода поступала в турбину сверху через трубу, обхватывавшую вал турбины, и попадала на лопатки направляющего аппарата. Эти лопатки принуждали воду двигаться по кривой линии, вследствие чего она втекала в горизонтальном направлении в лопатки турбинного колеса, без удара, по всей его внутренней окружности, отдавая последнему всю свою энергию, а затем равномерно стекала по его внутренней окружности. Вновь поступающая и отработанная вода нигде не смешивалась между собой. Турбинное колесо было накрепко соединено с вертикальным валом  $O$ , через который передавалось движение. КПД турбины Фурнейрона достигал 80%. Созданная им конструкция имела громадное значение для дальнейшей истории турбостроения. Слух об этом удивительном изобретении быстро распространился по всей Европе. Специалисты-инженеры из многих стран в течение нескольких лет приезжали в глухое местечко Шварцвальда, чтобы осмотреть работавшую там турбину Фурнейрона как великую достопримечательность. Вскоре турбины стали строить по всему миру. Переход к турбинам стал революционным переворотом в истории гидравлических двигателей. В приведенном выше кратком описании турбины Фурнейрона трудно увидеть колесо Сегнера, однако оно основано на том же принципе использования реактивного движения водяной струи (отчего этот тип турбин и получил позже название реактивных). Просто Фурнейрон внимательно учел все замечания Эйлера и использовал свой собственный опыт инженера-гидравлика. Турбина Фурнейрона отличалась от водяного колеса несколькими принципиальными моментами. В водяном колесе вода входила и выходила в одном и том же месте. Из-за этого как скорость, так и направление движения воды в лопатке колеса были различны в разные моменты времени - колесо как бы затрачивало изрядную часть своей полезной мощности на постоянное преодоление сопротивления струи. В турбине Фурнейрона вода из направляющего аппарата входила на одну кромку лопатки колеса, проходила по лопатке и стекала с другой ее стороны. Вследствие этого в турбине вода не останавливалась, не меняла направления своего течения на обратное, а от входных до выходных кромок текла непрерывно. В каждой точке лопаток скорость ее была одинакова по направлению и отличалась только по величине. В результате скорость вращения турбины теоретически зависела только от скорости воды, и поэтому турбина могла вращаться в несколько десятков раз быстрее обычного водяного колеса. Другое выгодное отличие турбины заключалось в том, что вода одновременно проходила по всем лопаткам колеса, а в водяном колесе - только через некоторые. В результате, энергия водяной струи использовалась в турбине гораздо полнее, чем в водяном колесе, а ее габариты при той же мощности были в несколько раз меньше. В последующие годы создано несколько основных видов гидротурбин. Не

вдаваясь здесь в подробности, отметим, что все турбины XIX века можно условно разделить на два основных типа: реактивные и струйные. Реактивная турбина, как уже говорилось, представляла собой усовершенствованное колесо Сегнера. Она имела турбинное колесо, насаженное на вал, с особым образом искривленными лопатками. Это колесо заключало внутри себя или было окружено направляющим аппаратом. Последний представлял из себя неподвижное колесо с направляющими лопатками. Вода устремлялась вниз через направляющий аппарат и турбинное колесо, причем лопатки первого направляли воду на лопатки второго. При выливании вода давила на лопатки и вращала колесо. От вала вращение передавалось дальше к какому-нибудь устройству (например, электрогенератору). Реактивные турбины оказались очень удобны там, где напор воды невелик, но есть возможность создать перепад в 10-15 м. Они получили в XX веке очень широкое распространение.

Другим распространенным типом турбин были струйные. Их принципиальное устройство заключалось в том, что струя воды под сильным напором ударяла в лопатки колеса и этим заставляла его вращаться. Сходство струйной турбины с нижнебойным колесом очень велико. Прообразы таких турбин появились еще в средние века, как это можно заключить из некоторых изображений того времени. В 1884 году американский инженер Пельтон значительно усовершенствовал струйную турбину, создав новую конструкцию рабочего колеса. В этом колесе гладкие лопатки прежней струйной турбины были заменены особенными, им изобретенными, имеющими вид двух соединенных вместе ложек. Таким образом, лопатки получились не плоскими, а вогнутыми, с острым ребром посередине. При таком устройстве лопаток работа воды почти целиком шла на вращение колеса и только очень малая ее часть терялась бесполезно. Вода к турбине Пельтона поступала по трубе, идущей от запруды или водопада. Там, где воды было много, труба делалась толстой, а где воды оказывалось меньше, она была тоньше. На конце трубы имелся наконечник, или сопло, из которого вода вырывалась сильной струей. Струя попадала в ложкообразные лопатки колеса, острое ребро лопатки резало ее пополам, вода толкала лопатки вперед, и турбинное колесо начинало вращаться. Отработанная вода стекала вниз в отводную трубу. Колесо с лопатками и соплом прикрывалось сверху кожухом из чугуна или железа. При сильном напоре колесо Пельтона вращалось с огромной скоростью, делая до 1000 оборотов в минуту. Оно было удобно там, где имелась возможность создать сильный напор воды. КПД турбины Пельтона был очень высок и приближался к 85%, поэтому она и получила широчайшее распространение.

#### **6.4 Компоненты гидроэлектростанций**

Гидротурбина является, как уже было упомянуто выше, основным компонентом гидроэлектростанции. Турбина предназначена для преобразования механической энергии протекающей через нее воды в полезную энергию на вращающемся валу.

Гидравлические турбины, по действию воды на рабочее колесо, можно классифицировать на два вида: *активные (водоструйные)* и *реактивные (работающие с избытком давления)* [StK94].

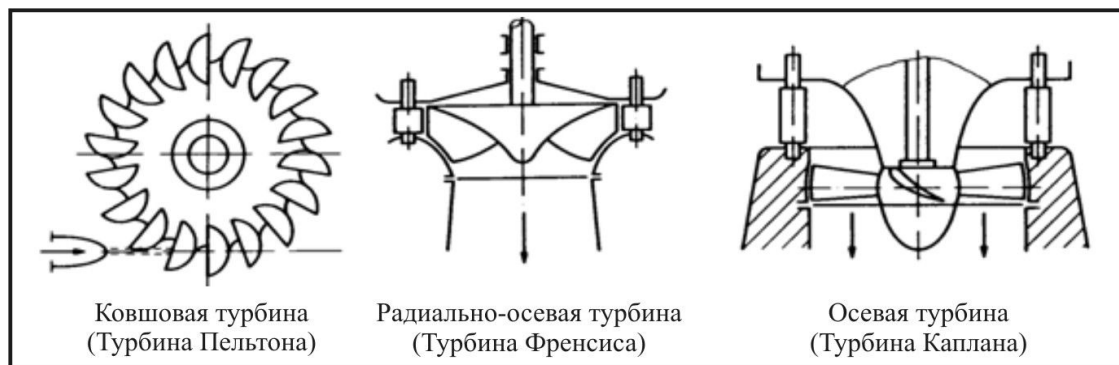


Рис.6.28 Некоторые виды гидротурбины

Оба вида различаются по внешним признакам: в активных турбинах рабочее колесо не погружено в поток, а в реактивных оно помещено внутрь потока.

Представителем реактивных турбин является - *ковшовая турбина*, была разработана американцем Лестер Ален Пельтоном, за рубежом её называют также *турбиной Пельтона*. Высоконапорная турбина Пельтона основана на использовании кинетической энергии потока. На рис.6.29 [Обр88] представлена схема ковшовой гидротурбины и некоторые её основные компоненты. По напорному подводящему трубопроводу (1) поступает вода, кинетическая энергия которой преобразуется в механическую энергию вращения вала ковшовой гидротурбины. Сопло и рабочее колесо установлены выше уровня воды так, что рабочее колесо вращается в воздухе. Сопло с *иглой* (3) позволяет регулировать поток воды, поступающей на *рабочее колесо с ковшами* (5) с помощью *механизма управления иглой* (2). Когда игла внутри, сопло работает с полным сечением и пропускает наибольший поток. По мере выдвигания иглы проходное сечение сопла сокращается, уменьшается диаметр струи и соответственно уменьшается пропускаемый поток. Игла может полностью перекрыть сопло, и тогда расход воды будет равен нулю. Таким образом, сопло активных турбин выполняет роль запорного органа турбины. Именно за счет изменения расхода регулируют мощность, развиваемую ковшовой турбиной. Струя воды под действием напора  $H_{зэс}$ , выбрасывается из сопла со скоростью  $v_c$  м/с<sup>2</sup>, которая определяется зависимостью:

$$v_c = \varphi \sqrt{2g_3 H_{зэс}}, \quad (6.5)$$

где  $\varphi = 0,98 \div 0,99$  коэффициент скорости,  $g_3 = 9,81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения.

Если учесть напоры, при которых используются ковшовые турбины, то видно, что скорость  $v_c$  получается очень большой: так, при  $H=600$  м



скорость  $v_c = 105$  м/с, а при  $H = 1500$  м скорость  $v_c = 165$  м/с. При истечении из сопла проявляется эффект сжатия струи, в результате чего диаметр струи  $d_c$  меньше диаметра сопла.

Все части ковшовой турбины опираются на корпус или станину (6). Для защиты от разбрызгивания воды служит кожух (4). По каналу (7) производится отвод воды от рабочего колеса.

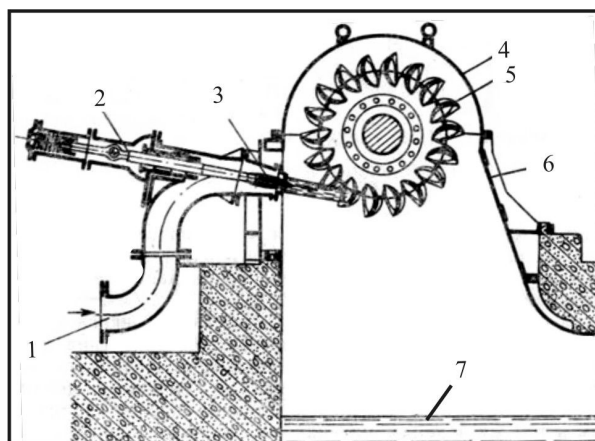


Рис. 6.29. Схема ковшовой гидротурбины с горизонтальным валом

В *осевых* турбинах (турбины Каплана) поток подводится к колесу и отводится от него по цилиндрическим поверхностям, параллельным оси турбины. Это и послужило основанием назвать этот вид турбин осевыми. Подвод воды к рабочему колесу осуществляется по турбинной камере, через статор и направляющий аппарат.

В *радиально-осевых* (за рубежом их обычно называют турбины Френсиса) турбинах поток подводится к рабочему колесу по радиальным к оси турбины поверхностям, а отводится так же, как и у осевых турбин параллельно оси турбины. Это и послужило основанием назвать этот вид турбин радиально-осевым.

В *диагональных* турбинах поток подводится к рабочему колесу и отводится от него по конусным поверхностям, образующим с осью турбины некоторый угол.

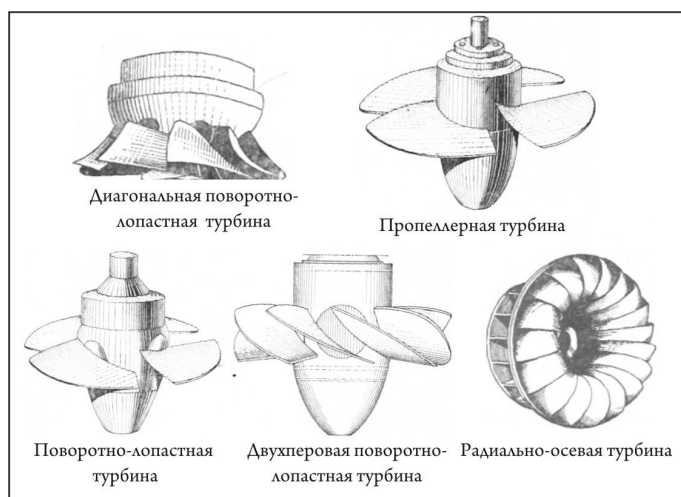


Рис.6.30 Рабочие колеса реактивных турбин [Жаб09].



*Системы турбин* различаются и по конструктивным признакам. Так, осевые турбины бывают *пропеллерные* и *поворотно-лопастные*. У пропеллерных турбин лопасти неподвижны относительно корпуса рабочего колеса, у поворотно-лопастных - лопасти имеют возможность поворачиваться относительно корпуса и становиться под разным углом к потоку.

*Турбинная камера.* Подводящая часть турбины состоит из турбинной камеры, статора и направляющего аппарата. Устройство этих элементов у всех реактивных турбин имеет много общего.

*Турбинная камера* должна обеспечить равномерный осесимметричный подвод воды по всей окружности направляющего аппарата и минимальный уровень гидравлических потерь в самой камере и при входе в направляющий аппарат.

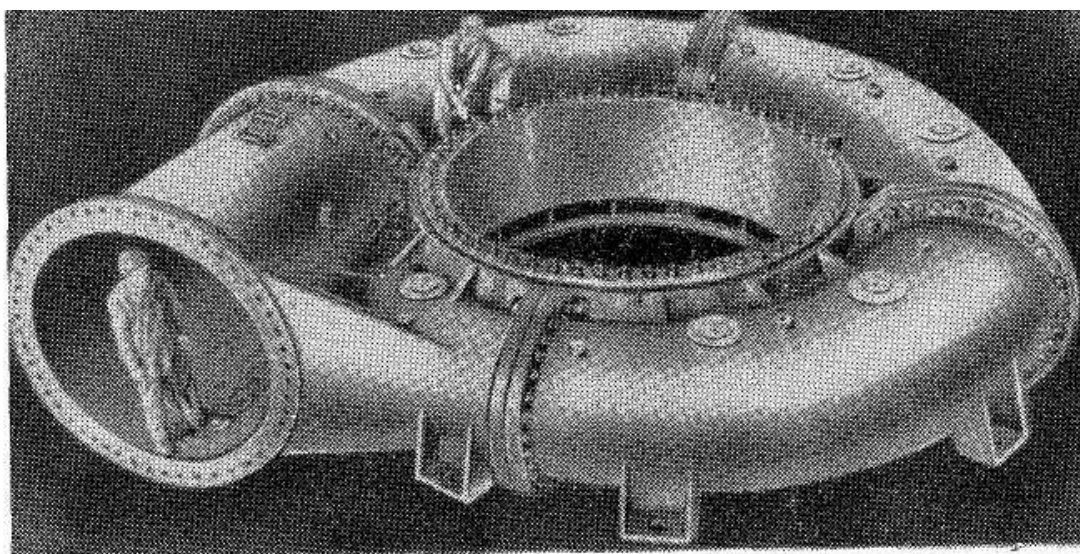


Рис. 6.31 Литая стальная турбинная камера **Жа6091**.

По конструкции турбинные камеры делятся на открытые, кожуховые, прямоосные и спиральные. Применение той или иной конструкции зависит от напора и размера турбины. В крупных гидротурбинах обычно используются прямоосные и спиральные камеры. Прямоосные турбинные камеры применяются для горизонтальных гидроагрегатов капсульного типа с осевыми турбинами для напоров до 25 м. Они имеют прямоугольное входное сечение, которое по мере приближения к капсуле переходит в круглое кольцевое сечение.

Спиральные турбинные камеры имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими способами подвода. Их применение обеспечивает:

- равномерный или близкий к этому подвод воды по всей окружности направляющего аппарата и высокий КПД;
- применение турбины практически любой мощности;
- наименьшие габариты гидроагрегатного блока и всего здания ГЭС;

➤ возможность применения различных компоновок ГЭС.

В зависимости от значения напора спиральные камеры выполняются бетонными, металлическими или сталежелезобетонными.

При напорах до 50 м применяются бетонные, от 50 до 80 м – бетонные с металлической облицовкой, от 40 до 700 м – металлические в сварном или литом исполнении, при напорах 100-300 м и больших расходах – сталежелезобетонные камеры.

Одним из основных параметров спиральной камеры является угол охвата спирального канала  $\varphi_0$ , от которого в большой степени зависят ее гидравлические и геометрические характеристики.

Угол охвата в металлических спиральных камерах обычно принимается около  $342-360^\circ$ , а в бетонных камерах таврового сечения - в пределах  $180-270^\circ$ . Наименьшая ширина спиральной камеры в плане и соответственно наименьшая ширина гидроагрегатного блока получается при  $\varphi_0 = 180^\circ$ .

*Статор турбины* служит для передачи на фундамент установки нагрузок от веса неподвижных и вращающихся частей агрегата, осевого гидравлического давления воды на рабочее колесо и веса бетонного перекрытия. Статор турбины состоит из двух колец (верхнего 1 и нижнего 3) (рис. 4-9), соединенных между собой колоннами удобообтекаемой формы (ребрами) 2. Пройдя колонны статора, вода поступает на лопатки направляющего аппарата. По условиям рабочего процесса в турбине статор не трется. Он применяется только как несущая конструкция.

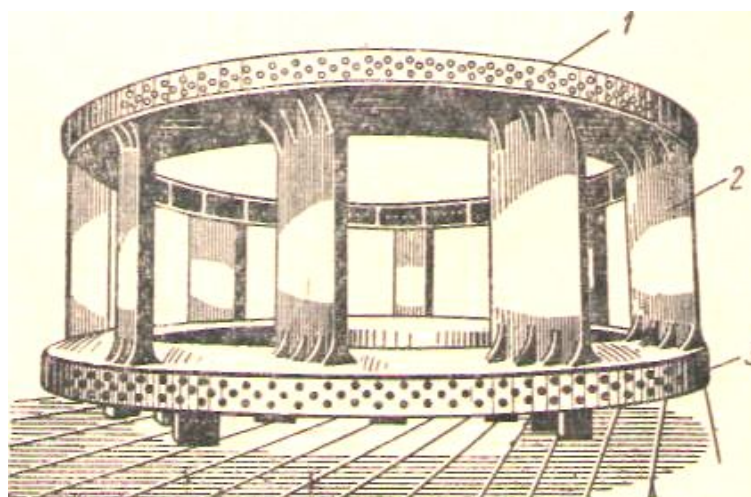


Рис. 6.32 Статор турбины [Жаб09]

*Направляющий аппарат.* Он имеет следующее назначение:

- 1) изменять величину и направление скоростей в потоке на участке между направляющим аппаратом и рабочим колесом турбины и тем самым создавать благоприятные условия входа воды на лопасти рабочего колеса;
- 2) регулировать мощность турбины посредством изменения расхода воды;
- 3) полностью прекращать доступ воды к рабочему колесу турбины.

В зависимости от размеров турбины направляющий аппарат имеет количество поворотных лопаток  $z_0$  от 16 до 32, расположенных по окружности и имеющих возможность одновременно поворачиваться вокруг своих осей.

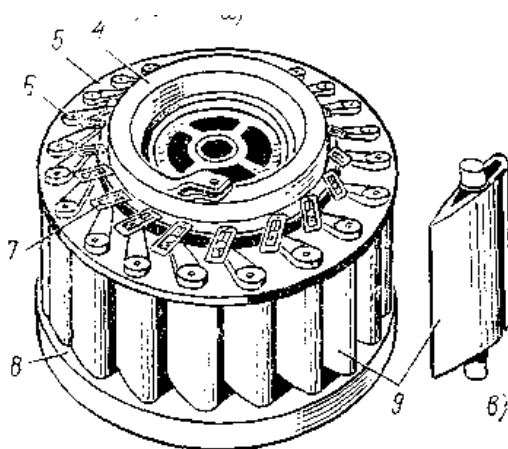


Рис. 6.33 Направляющий аппарат [Жаб09].

*Рабочее колесо осевой турбины* состоит из лопастей рабочего колеса с обтекателем. Количество лопастей от 4 до 8. Чем больше напор, тем больше количество лопастей.

*Рабочее колесо радиально-осевой турбины* состоит из 12-17 лопастей, образующих круговую решетку лопастей. Лопасты жестко заделаны в ступицу и обод, благодаря чему все рабочее колесо получает необходимую жесткость и прочность.

*Диагональные турбины* отличаются от осевых тем, что лопасти рабочего колеса установлены с наклоном к оси вращения (угол  $45-60^\circ$ ). Число лопастей 9-10 штук.

*Отсасывающая труба.* Отвод воды от рабочего колеса у всех реактивных турбин осуществляется отсасывающей трубой, представляющий собой расширяющийся водовод (диффузор), обеспечивающий плавное снижение скорости до выхода потока в нижний бьеф. Такое снижение скорости позволяет уменьшить кинетическую энергию потока при выходе из турбины и за счет этого повысить мощность и КПД турбины.

*Типы отсасывающих труб.* Их можно разделить на два вида: прямоосные и изогнутые.

*Прямоосные отсасывающие трубы.* Наиболее простым типом является прямая коническая труба, которая имеет хорошие энергетические показатели, однако ее необходимая длина  $L_{отс}$  получается весьма значительной, что для крупных вертикальных турбин приводит к большому заглублению основания и повышению стоимости ГЭС. В связи с этим в настоящее время такие трубы применяются только для мелких турбин.

*Изогнутые отсасывающие трубы* используются практически на всех гидроэлектростанциях с крупными вертикальными турбинами. Такая труба состоит из трех основных частей: конуса, колена и отводящего диффузора. В



пределах конуса поперечные сечения трубы круглые, далее в колене они плавно переходят в прямоугольные с более быстрым увеличением ширины и в диффузорной части сохраняются прямоугольными, причем сечение нарастает за счет высоты (потолок имеет наклон под углом  $\alpha$ ).

## 6.5 Гидрология - основа для проектирования ГЭС

Гидроэлектростанции для выработки электрической энергии используют *речной сток*, закономерности изменения которого изучает гидрология.

Гидрология («гидро»- вода, «логос» - учение) - наука, занимающаяся изучением природных вод, явлений и процессов, в них протекающих, а также процессов, определяющих распространение вод по земной поверхности в толще почвогрунтов, и закономерностей, по которым эти процессы развиваются.

Уравнение водного баланса бассейна какой-либо реки в среднем для многолетнего периода:

$$y = x_o - z_{uc}, \quad (6.6)$$

где  $y$  - высота речного стока, мм;  $x_o$  - осадки, мм;  $z_{uc}$  - испарение, мм.

Объем стока,  $m^3$ : можно выразить через высоту речного стока  $y$ , м, и площадь водосбросного бассейна  $F$ ,  $m^2$ :

$$W = \frac{F \cdot y}{10^3}. \quad (6.7)$$

*Коэффициент стока* - это отношение стока к осадкам. Коэффициент стока показывает, какая часть осадков превращается в сток. На территориях стран СНГ в северных и восточных районах коэффициент стока варьируется в пределах 0,6 - 0,7, а для центральной Азии 0,2 - 0,3.

$$k_{cm} = \frac{y}{x_o}. \quad (6.8)$$

*Расход воды,  $m^3/c$* , - это мгновенный (секундный), среднесуточный, среднедекадный, среднemesячный, среднегодовой, среднемноголетний, т.е. средний расход воды за тот или иной промежуток времени. Основной характеристикой реки является среднемноголетний расход, проходящий по реке в среднем за многолетний период наблюдений.

*Модуль стока,  $л/с \cdot км^2$* , - расход воды, поступающей в реку с единицы площади водосбора. Вычисляется как мгновенный расход, характеризующий интенсивность питания реки в каждый данный момент времени, так и средний расход, соответствующий среднему за этот период расходу воды в реке. Для наглядного изображения колебаний стока рек служит специальная система графиков. Основным исходным графиком является хронологический график изменения расходов воды в реке - *гидрограф*.

Принято различать три типичных состояния расходов реки, которые отчетливо видны на ее гидрографах: *межень*, *половодье* и *паводок*.

*Межень* - период внутригодового цикла, в течение которого устойчиво наблюдается низкая водность, возникающая вследствие уменьшения притока воды с водосборной площади. В эти периоды преобладающее значение в речном стоке имеют подземные воды, дренируемые гидрографической сетью.

*Половодье* - фаза водного режима реки, характеризующаяся наибольшей в году водностью, высоким и длительным подъемом уровня, обычно сопровождаемым выходом реки из русла на пойму. Вызывается главным источником питания реки: на равнинных реках - снеготаянием (весеннее половодье), на высокогорных - таянием снега и ледников (летнее половодье).

*Паводок* - быстрый, сравнительно кратковременный подъем уровня воды в каком-либо фиксированном створе реки, завершающийся почти столь же быстрым спадом и, в отличие от половодья, возникающий нерегулярно; поднятие уровня и увеличение расхода воды при паводке могут в отдельных случаях превышать уровень и наибольший расход половодья. Паводок обычно возникает от дождей, но в условиях неустойчивой зимы может быть обусловлен интенсивным кратковременным снеготаянием. В процессе перемещения паводка по реке образуется паводочная волна.

С целью такого изучения необходимо создание математических моделей речного стока, позволяющих переносить выявленные закономерности его изменения во времени с периода наблюдений на период будущей эксплуатации проектируемых гидроэлектростанций.

Для проектирования и эксплуатации гидроэлектростанций необходимо иметь данные о следующих элементах режима рек:

А) уровень, скорости течения и расходов воды в реке;

Б) термический и ледовый режим реки. Многие реки в южных регионах страны не замерзают. Здесь сочетается стремительное течение воды с переменным температурным режимом. Вода в реках то переохлаждается, то вновь нагревается. В периоды похолоданий в реках образуется и накапливается взвешенный и донный лед. Периоды похолодания обычно оказываются недостаточными для образования ледяного покрова. На таких реках зимой часто появляется шуга - всплывший на поверхность донный лед. Движение шуги, так называемый шугоход, часто затрудняет эксплуатацию гидроэлектростанций;

В) перемещения и характеристики наносов. Наносы заиляют водохранилища. Расчет времени заиления является важным элементом проектирования водохранилищ ГЭС. Для некоторых рек для борьбы с наносами в составе гидроузлов ГЭС приходится предусматривать специальные сооружения: отстойники, промывные галереи.

## 6.6 Вопросы для самопроверки и примеры решения задач

1. Что такое водные ресурсы?
2. Опишите круговорот воды в природе.
3. Что такое гидроэнергетические установки?
4. Принцип работы гидроаккумулирующей станции.
5. Что такое приливная станция?
6. Первые водяные колеса.
7. Какие типы гидротурбин Вы знаете?
8. Гидротурбина Пельтона.
9. Что такое направляющий аппарат?
10. Для чего нужна отсасывающая труба?
11. Что изучает гидрология?
12. Какие основные характеристики элементов реки необходимо знать для проектирования гидроэлектростанции?

*Задача №1.* Оцените мощность Пельтон - турбины при напоре, равном 40 м, и расходе 0,1 м<sup>3</sup>/с. При необходимости введите другие необходимые данные.

*Решение:*

1. Мощность для турбин вычисляется по формуле:

$$N_{гэс} = g_3 \cdot Q_{гэс} \cdot H_{гэс} \cdot \rho_{воды} \cdot \eta_{гэс} = 9,81 \cdot 0,1 \cdot 40 \cdot 1000 \cdot 0,90 = 35000 \text{ (Вт)}.$$

2. Скорость потока из сопел на рабочее колесо турбины:

$$v_c = \varphi \sqrt{2g_3 H_{гэс}} = 0,99 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 40} = 28 \text{ (м/с)}.$$

*Задача №2.* Оцените высоту, объем и коэффициент речного стока для участка реки Сусамыр площадью 5000 м<sup>2</sup>, если на территории Сусамыра были зафиксированы среднегодовые осадки в размере 376 мм, среднегодовое испарение принять равным 285 мм.

*Решение:*

1. Высота речного стока:

$$y = x_o - z_{ис.} = 376 - 266 = 110 \text{ (мм)}.$$

2. Объем речного стока для участка реки:

$$W = \frac{F \cdot y}{10^3} = \frac{5000 \cdot 110}{10^3} = 550 \text{ (м}^3\text{)}.$$

3. Коэффициент речного стока:

$$k_{ст} = \frac{y}{x_o} = \frac{110}{376} = 0,29.$$

## ГЛАВА 7. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

### 7.1 Энергия ветра

*Энергия ветра* – это форма проявления солнечной энергии. Благодаря солнечному излучению происходит неравномерный нагрев поверхности Земли, который влечет за собой движение воздушных масс. Поверхность воды и территории, закрытые облаками, нагреваются медленнее, соответственно поверхность земли, незатененная от солнечного излучения, нагревается быстрее. Воздух, находящийся над нагретой поверхностью, нагревается и поднимается вверх, создавая области пониженного давления. Воздух из областей повышенного давления перемещается в направлении областей низкого давления, создавая тем самым, ветер.

Направление и скорость ветра меняются в течение года и дня. Например, утром солнце нагревает землю быстрее, чем воду, поэтому ветер дует в направлении побережья. Вечером же земля остывает быстрее, чем вода, что приводит к появлению ветра от побережья.

Первые ветроустановки уже были известны в 200 году до нашей эры. Они представляли собой простейшие установки, предназначенные для перемалывания пшеницы.

В метеорологии мерой силы ветра часто является шкала Бофорта (табл.7.1) [Тва90].

Табл.7.1

Сила ветра по шкале Бофорта

Баллы Бофорта	Скорость ветра, м/с	Характеристика Силы ветра	Наблюдаемые эффекты действия
0	0...0,2	Штиль	Дым из труб поднимается вертикально
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
3	3,6...5,8	Слабый	Колеблются листья на деревьях, развеваются легкие флаги, на отдельных волнах появляются гребни
4	5,8...8,5	Умеренный	Колеблются тонкие ветки деревьев, поднимается пыль и клочки бумаги, на воде много гребней
5	8,5...11	Свежий	Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в гребнях
6	11...14	Сильный	Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят телефонные провода, пенятся гребни волн
7	14...17	Крепкий	Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена
8	17...21	Очень крепкий	Ломаются ветки деревьев, трудно идти против ветра, с волн срываются клочья пены
9	21...25	Шторм	Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы
10	25...29	Сильный шторм	Значительные разрушения, деревья вырываются с корнем
11	29...34	Жестокий шторм	Широкомасштабные разрушения
12	> 34	Ураган	Опустошительные разрушения

Самый важный параметр для оценки ветрового потенциала в любой местности это среднегодовая скорость ветра. По данным среднегодовых скоростей ветра далее строится многолетняя среднегодовая скорость ветра. Выгодным с энергетической, а также с экономической стороны является ветровой потенциал при средней многолетней скорости ветра значительно выше 4 м/с на высоте 10м.

В табл.7.2 [НПС89] приведены средние месячные и годовая скорость ветра (м/с) для некоторых районов КР, вычисленные из на основании ежегодных месячных значений скорости ветра за период 1936-1980. Статистическая ошибка расчета скорости ветра составляет 0,05 – 0,01 м/с. Как видно из таблицы, достаточным ветропотенциалом обладают Балыкчы, Тюя-Ашу сев., где многолетняя среднегодовая скорость немного превышает 4,0 м/с. Приведенная табл.7.2 отражает среднемесячные скорости ветра, но не дает нам информации о продолжительности штиля (безветрия) или, наоборот, о частоте продолжительности ураганов.

Табл.7.2

Средние месячная и годовая скорость ветра

Станция	Высота флюгера (м)	Месяц (скорость указана в м/с)												Год
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Фрунзе	11,2	1,7	1,8	2,0	2,2	2,1	2,2	2,1	1,9	2,0	1,9	1,7	1,6	1,9
Тюя-Ашу сев	11	5,2	5,3	5,0	4,0	3,0	3,0	2,8	2,7	3,2	4,6	5,0	5,0	4,1
Талас	10,6	2,1	2,2	2,2	2,5	2,4	2,5	2,4	2,4	2,4	2,2	2,0	2,0	2,3
Чолпон-Ата	10,6	1,9	2,0	1,7	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5	1,7	1,9	2,1	2,0	1,8
Балыкчы	11,0	3,7	4,3	4,5	4,8	4,3	3,6	3,3	3,6	4,0	4,4	4,3	3,6	4,1
Нарын	10,2	1,2	1,4	1,6	2,1	2,2	2,4	2,5	2,4	2,3	1,9	1,4	1,2	1,9

Поэтому другим важным параметром является распределение скоростей ветра за год. Именно из таких многолетних таблиц или кривых можно приблизительно оценить реальный потенциал выработки будущей ветроустановки. На рис.7.1 [ОАД08] приведены теоретическая функция повторяемости распределения ветра (*распределение Вейбулла*) и фактическая повторяемость скорости ветра по градациям. Повторяемость скорости ветра по градациям строится на основании табличных данных наблюдений. Распределение Вейбулла определяется по формуле:

$$t(v) = \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma}\right), \quad (7.1)$$



где  $\gamma$  - параметр формы (Formparameter) распределения скорости ветра по формуле Вейбулла,  $\beta$  - масштабный параметра (Scale Parameter) распределения скорости ветра по формуле Вейбулла.

Параметр формы и масштабный параметр зависят от местности. Если известны данные параметры, то можно оценить среднюю скорость для данной местности [Мо190]:

$$v_{cp.} = \beta \cdot \left(0,568 + \frac{0,434}{\gamma}\right)^{\frac{1}{\gamma}}. \quad (7.2)$$

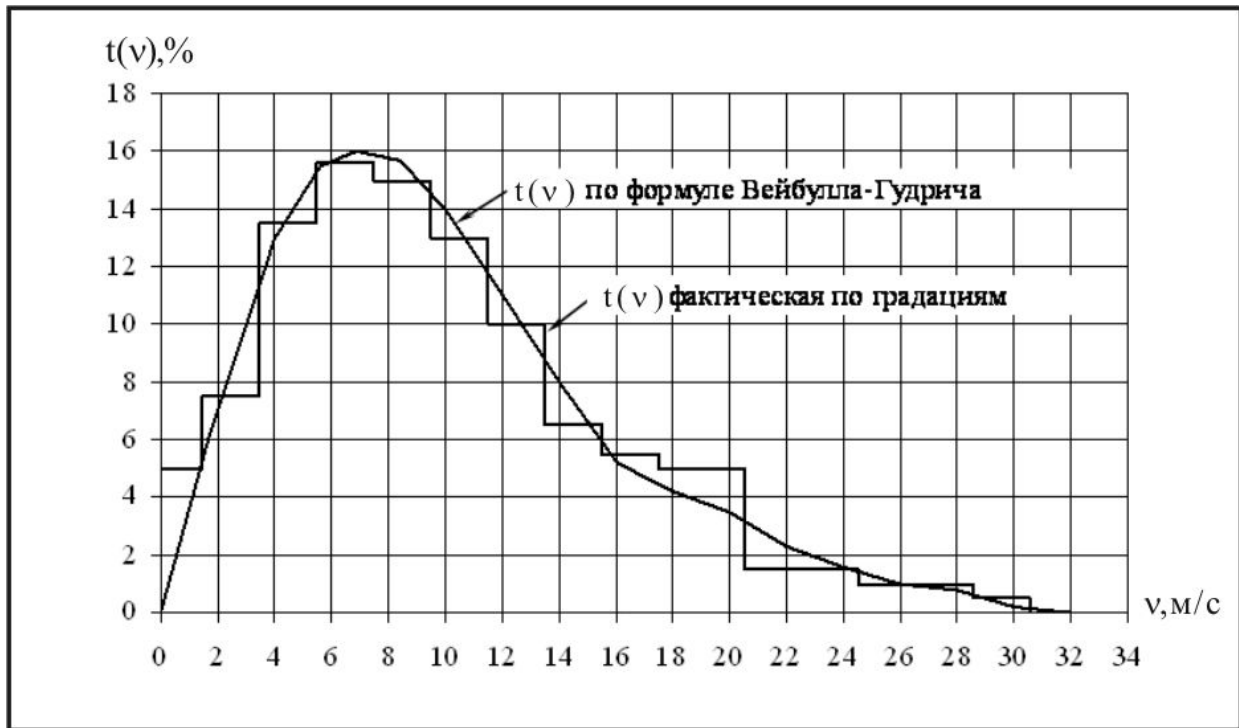


Рис.7.1 Распределение повторения скорости ветра

Скорость ветра изменяется с изменением высоты над уровнем поверхности Земли, и не секрет, что ветер затормаживается рельефом поверхности (деревья, заграждения...).

Скорость ветра ( $v_i$ ) на любой высоте ( $h_i$ ) может быть найдена через так называемый *логарифмический профиль пограничного слоя и высоты шероховатости  $z_0$*  с помощью известной скорости ( $v_1$ ) на высоте ( $h_1$ ) [Chr89].:

$$v_i = v_1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_2 - d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1 - d}{z_0}\right)}, \quad (7.3)$$

где  $v_i$  - скорость ветра на высоте  $h_i$ , м/с;  $v_1$  - скорость ветра на высоте  $h_1$ , м/с;  $z_0$  - высота шероховатости, м;  $d$  - структура препятствий, если

препятствия сосредоточены далеко друг от друга, то  $d = 0$ , если сконцентрированы, то  $d$  принимается равным 70% от высоты препятствий.

Высота препятствия  $z_0$  физически выражает высоту, на которой происходит торможение скорости ветра до нуля. Чем больше коэффициент  $z_0$ , тем большее влияние создается поверхностью на ветровой поток.

Табл.7.3

Значение коэффициента шероховатости

Класс местности	Высота шероховатости $z_0$ , м	Описание местности
1-море	0,0002	Поверхность морей
2-ровная поверхность	0,005	Береговые зоны
3-открытая поверхность	0,03	Открытые плоские местности
4-открытая с небольшими насаждениями	0,1	Сельскохозяйственные поля с низкими насаждениями
5- небольшие неровности	0,25	Сельскохозяйственные поля с высокими насаждениями
6- с существенными неровностями	0,5	Парковые зоны с кустарниками и деревьями
7- закрытые	1	Пригород, леса, деревни
8- центр города	2	Центры больших городов с высокими и низкими застройками

## 7.2 Использование энергии ветрового потока

Ветер со средней скоростью  $v$  обладает кинетической энергией, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$E_g = \frac{m_g v^2}{2}, \quad (7.4)$$

где  $E_g$  - кинетическая энергия ветра, Дж;  $m_g$  - масса воздушного потока, кг;  $v$  - скорость ветра, м/с.

Мощность данного ветра, по определению - это энергия в единицу времени:

$$N = \dot{E} = \frac{\dot{m} v^2}{2}. \quad (7.5)$$

Учитывая, что масса воздуха ( $m_g$ ) - это произведение объема воздуха ( $V$ ) на плотность воздуха ( $\rho$ ):  $m = V \cdot \rho$ , можно рассчитать массовый расход воздуха:

$$\dot{m}_g = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot \dot{s} = \rho \cdot A \cdot v, \quad (7.6)$$

где  $\dot{s}$  - производная расстояния,  $A$  - площадь воздушного потока.

Преобразовав (7.4) и (7.5), получим, что мощность ветрового потока определяется:

$$N = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2}. \quad (7.7)$$

При использовании энергии ветра ветровыми агрегатами или ветряными мельницами, ветровой поток отдает энергию и тем самым теряет скорость, однако массовый расход ветра остается постоянным до и после использования:  $\dot{m}_e = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot v_1 = \rho \cdot A \cdot v = \rho \cdot A \cdot v_2$

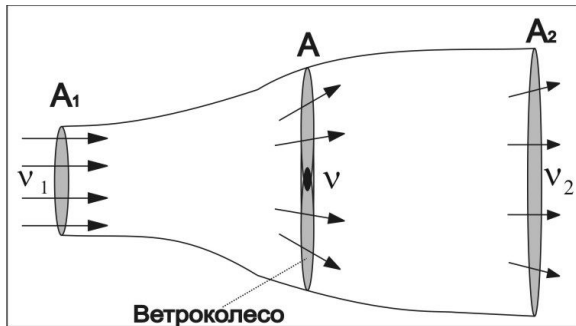


Рис.7.2 Ветровой поток, действующий на ветроколесо

Будем считать, что скорость и плотность воздуха одинаковы в любом поперечном сечении, а так же пренебрежем всеми воздушными возмущениями воздуха. На рис.7.2  $A$ -площадь, ометаемая ветроколесом,  $A_1$  и  $A_2$  площади поперечных сечений, проходящих через ветроколесо ветрового потока соответственно до и за ним.  $v_1, v, v_2$

соответственно скорости в данных сечениях  $A_1, A, A_2$ .

Действующая на ветроколесо сила  $F$  равна изменению количества движения массы проходящего через него в единицу времени воздуха (массового расхода  $\dot{m}$ ):

$$F = \dot{m} \cdot v_1 - \dot{m} \cdot v_2 = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2). \quad (7.8)$$

Эта сила действует на ветроколесо со стороны протекающего через него воздушного потока, который можно считать однородным и имеющим скорость  $v$ . Мощность, развиваемая этой силой, т.е мощность ветроколеса:

$$N_B = F \cdot v = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot v. \quad (7.9)$$

Учитывая, что  $N_B$  есть энергия, теряемая в единицу времени ветровым потоком, взаимодействующим с ветроколесом, и приравняв мощности друг к другу можно выразить скорость ветра в сечении ветроколеса:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (7.10)$$

Из этого выражения вытекает, что скорость воздушного потока в плоскости ветроколеса не может быть меньше половины скорости набегающего потока.

Мощность, развиваемая ветроколесом, можно выразить, объединяя формулу 3 в 5:

$$N_B = \frac{\rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot v}{2} = \frac{\rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2} \cdot \frac{(v_1 + v_2)}{2} = \frac{\rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{4}. \quad (7.11)$$

В случае отсутствия ветроколеса, в этом сечении мощность ветрового потока составила бы:

$$N = \frac{\rho \cdot A \cdot v_1^3}{2}. \quad (7.12)$$

Отношение отобранной мощности ветроколесом  $N_B$  к обладающей мощности ветрового потока  $N$  называют *коэффициентом мощности*  $c_p$ :

$$c_p = \frac{N_B}{N} = \frac{(v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{2 \cdot v_1}. \quad (7.13)$$

Максимальное (идеальное) значение коэффициент мощности ( $c_p$ ) достигает при соотношении скоростей до и после ветроколеса равным  $1/3$ , т.е. при  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{3}$ . Это было открыто Бетцом в 1920 году и поэтому максимальный коэффициент мощности обозначим через  $c_{p,бетц}$ :

$$c_{p,бетц} = \frac{16}{27} = 0,593. \quad (7.14)$$

Из выражения видно, что в лучшем случае ветроустановка может использовать чуть больше половины энергии набегающего ветрового потока. Это объясняется тем, что воздушный поток должен обладать определенной кинетической энергией, чтобы покинуть окрестность ветроколеса [Тва90].

В реальности современные ветроагрегаты не достигают этого максимума. Хорошие ветроэнергетические установки имеют коэффициент мощности 0,5. Коэффициент полезного действия ветроколеса - это отношение отобранной мощности ветроколесом к максимальному возможному отбору мощности:

$$\eta = \frac{N_{от}}{N_{max}} = \frac{N_{от}}{N \cdot c_{p,бетца}} = \frac{c_p}{c_{p,бетца}}. \quad (7.15)$$

### 7.3 Ветроустановки, использующие силу сопротивления

Ветровой поток, набегаая на лопасти ветроустановок, приводит их во вращение. При этом вращающей силой может быть *сила сопротивления* или *подъемная сила*. В настоящее время применяются, в основном, ветроустановки, использующие подъемную силу. Они характеризуются большим коэффициентом мощности.

Помимо возникновения сил приводящих к вращению ветроколеса, возникают следующие явления:

А) завихрение воздушного потока, обтекающего лопасти. Это порождает закрутки воздушного потока за плоскостью ветроколеса, т.е. его вращение относительно вектора набегающего потока;

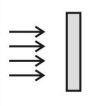
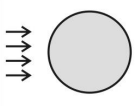
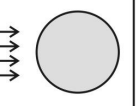
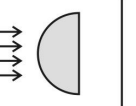
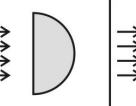
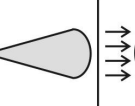
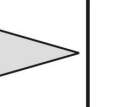
Б) турбулизация потока, т.е. хаотическое возмущение его скорости по величине и направлению. Турбулентность возникает как за колесом, так и перед ним, в результате лопасть часто оказывается в потоке, турбулизированном другими лопастями;

В) препятствие для набегающего потока. Это его свойство характеризуется параметром, называемым геометрическим заполнением и равным отношению площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку, к ометаемой ими площади.

*Ветроустановки использующие силу сопротивления.* При воздействии ветрового потока на любой предмет возникает сила сопротивления. Возникающая сила сопротивления прямо пропорциональна площади поперечного сечения объекта, расположенного перпендикулярно к направлению ветрового потока, а также *коэффициенту сопротивления* объекта. В табл. 7.4 [Her92] приведены коэффициенты сопротивления для различных форм объектов.

Табл.7.4

Коэффициент сопротивления объектов различной формы

Тела							
$c_c$ - коэффициент сопротивления	1,1...1,3 пластина	0,6...1,0 цилиндр	0,3...0,4 шар	0,34...0,4 полушар	1,2...1,3 полушар	0,16...0,2 конус и полушар	0,07...0,09 конус и полушар

Сила сопротивления  $F_c$ , возникающая при воздействии ветрового потока со скоростью  $v$  на неподвижную пластину, имеющую площадь  $A$  поперечного сечения, расположенного перпендикулярно ветровому потоку, можно записать в виде:

$$F_c = \frac{c_c \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}{2}. \quad (7.16)$$

где  $c_c$  - коэффициент сопротивления;  $\rho$  - плотность воздушного потока;

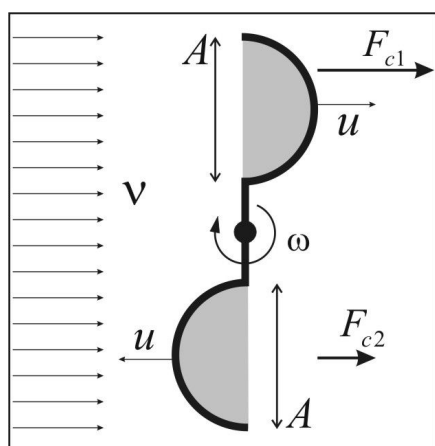


Рис.7.2 Ветровой поток воздействующий на ветроколес

Это сила совершает работу, приводят анемометр во вращение со скоростью  $u$ . Относительная скорость набегающего потока будет равняться арифметической сумме скоростей ветрового потока и вращения анемометра. Силы сопротивления, возникающие вследствие воздействия воздушного потока на лопасти анемометра, равны:

$$F_{c1} = \frac{c_{c1} \cdot \rho \cdot A \cdot (v - u)^2}{2}; \quad (7.17)$$

$$F_{c2} = \frac{c_{c2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v + u)^2}{2}. \quad (7.18)$$

Результирующая сила, создающая вращение анемометра:

$$F = F_{c1} - F_{c2} = \frac{c_{c1} \cdot \rho \cdot A \cdot (v - u)^2}{2} - \frac{c_{c2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v + u)^2}{2} = \frac{\rho \cdot A}{2} (c_{c1} (v - u)^2 - c_{c2} (v + u)^2) \quad (7.19)$$

Отношение окружной скорости конца лопастей  $u$  к невозмущенной скорости набегающего ветрового потока  $v$  называется *быстроходностью  $z$  ветроколеса*:

$$z = \frac{u}{v}. \quad (7.20)$$

Для ветроустановок, использующих силу сопротивления как основную вращающую силу, быстроходность всегда меньше единицы.

Соответственно, используемая мощность равна:

$$N_B = F_B \cdot u = \frac{\rho \cdot A}{2} (c_{c1} (v - u)^2 - c_{c2} (v + u)^2) \cdot u = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} (z \cdot (c_{c1} (1 - z)^2 - c_{c2} (1 + z)^2)) \quad (7.21)$$

Коэффициент мощности для чашечного анемометра определяется по формуле:

$$c_p = \frac{N_B}{N} = \frac{N_B}{\frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2}} = z \cdot (c_{c1} (1 - z)^2 - c_{c2} (1 + z)^2) \quad (7.22)$$

Максимальный коэффициент мощности, достигаемый для чашечного анемометра, составляет 0,073, и в восемь раз меньше максимально достигаемого коэффициента мощности Бенца 0,593.

За счет низкого коэффициента мощности ветроустановки использующие силу сопротивления, не распространены и ограничены в применении.

## 7.4 Ветроустановки, использующие подъемную силу

Современные ветроагрегаты используют подъемную силу как основную вращающую силу. На рис.7.3 [Hei06] представлены векторы скоростей и возникающие силы на сечение лопасти при воздействии ветрового потока. Ветровой поток обдувает двухлопастной ветроагрегат со скоростью  $v$ . Окружная скорость вращения лопасти в сечении А-А- $u$ .

В результате, суммируя два вектора скорости, получаем относительно данного сечения лопасти воздушный поток со скоростью  $v_r$ . Угол между плоскостью вращения ветроколеса и хордой сечения лопасти называют *углом заклинивания  $\gamma$* . Изменение угла заклинивания ведет к изменению *угла атаки*. Угол атаки  $\alpha$  - это угол между направлением набегающего потока и хордой сечения лопасти. Возникающие подъемная сила ( $F_n$ ) и сила

сопротивления ( $F_c$ ) напрямую зависят от угла атаки. По определению сила сопротивления ( $F_c$ ), действует параллельно, а подъемная сила ( $F_n$ ) - перпендикулярно вектору скорости ( $v_r$ ). В итоге, суммируя векторы силы сопротивления и подъемной силы, получаем результирующую силу ( $F$ ), которую можно разложить на две силы: осевую ( $F_o$ ), действующую по направлению ветра, и тангенциальную силу ( $F_m$ ), направленную перпендикулярно скорости ветра. Тангенциальная сила является причиной возникновения вращения лопастей ветроагрегата.

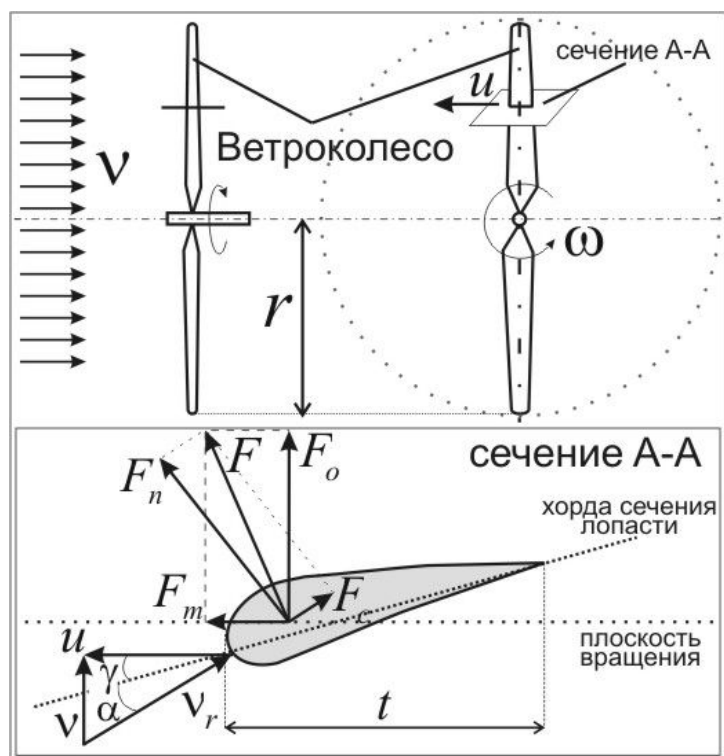


Рис.7.3 Векторы скоростей и возникающие силы на сечение лопасти

Сила сопротивления определяется по формуле:

$$F_c = \frac{c_c \cdot \rho \cdot A_n \cdot v_r^2}{2}, \quad (7.23)$$

где  $A_n$  - проекционная площадь,  $A_n = r \cdot t$  (7.24)

где  $t$  - проекция ширины лопасти, а  $r$  радиус лопасти.

Подъемная сила равна:

$$F_n = \frac{c_n \cdot \rho \cdot A_n \cdot v_r^2}{2}, \quad (7.25)$$

где  $c_n$  - коэффициент подъемного сопротивления.

Подъемная сила намного превосходит силу сопротивления в ветроустановках, работающих на подъемной силе. Отношение подъемной силы к силе сопротивления называют *аэродинамическим качеством*:

$$\varepsilon = \frac{F_n}{F_c}. \quad (7.26)$$

Скорость воздушного потока относительно данного сечения:

$$v_r = \sqrt{v^2 + u^2}. \quad (7.27)$$

Коэффициент быстроходности:

$$z = \frac{u}{v}. \quad (7.28)$$

Как правило, для ветроустановок, использующих подъемную силу как основную вращающую силу, коэффициент быстроходности всегда больше единицы.

Извлекаемая из ветрового потока мощность равна произведению коэффициента мощности на мощность  $c_p$  ветрового потока:

$$N_B = \frac{c_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3}{2}. \quad (7.29)$$

Заметим, что коэффициент мощности у ветроустановок, использующих подъемную силу, намного выше, чем у ветроустановок, использующих силу сопротивления.

### 7.5 Конструкции ветроэнергетических установок

Спектр технических решений по созданию конструкций ветроустановок очень велик. По расположению оси вращения ветроколеса подразделяются на ветроэнергетические установки горизонтального или вертикального типа. В зависимости от окружной скорости лопастей ветроколеса различают тихоходные и быстроходные ветроагрегаты.

Табл. 7.4

Классификация ветроустановок

<i>Использующие подъемную силу</i>		<i>Концентраторы</i>	<i>Использующие силу лобового сопротивления</i>
<i>Горизонтальная ось</i>	<i>Вертикальная ось</i>		
<i>Быстроходные</i> Однолопастные Двухлопастные Трехлопастные	<i>Быстроходные</i> Дарье Н-Ротор Дарье	Турбина в канале	Савониоус
		Ветроагрегат с диффузором	Чашечный анемометр
<i>Тихоходные</i> Старые ветровые мельницы Американские многолопастные Ротор Флетнера Парусный ротор Буксировочный ротор	<i>Тихоходные</i> Савониуса на подъемной силе	Канального типа	Откидные площади
		Торнадо тип	Наполовину экранированные
		Дельта-концентратор	
		Концентратор Бервиана	



Ветроустановки с вертикальной осью (рис.7.4) являются старыми конструкциями, в которых использовалась лишь сила лобного сопротивления. Ветроустановки вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Однако, такие установки гораздо больше подвержены к усталостным разрушениям из-за более часто возникающих в них автоколебательных процессов. Хотя основное распространение нашли ветроустановки с горизонтальной осью, исследование вертикально-осевых установок продолжается [Даф77].

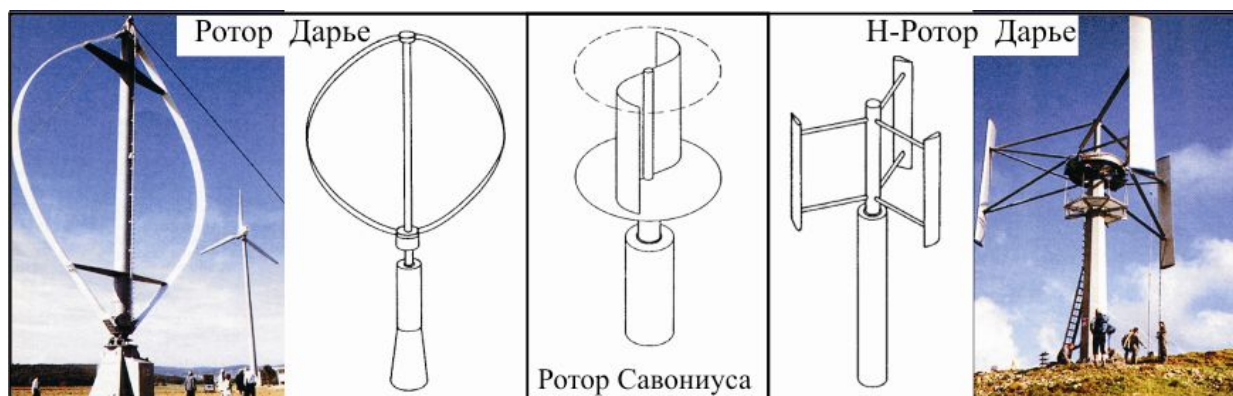


Рис.7.4 Ветроустановки с вертикальной осью

Самая известная ветроустановка с вертикальной осью - это *ротор Савониуса*. Конструкция представляет собой две полуцилиндрические лопасти, которые направлены в противоположные стороны. Возле оси вращения лопасти перекрывают друг друга, таким образом, ветер, обдумывая первую лопасть, переходит на вторую. Благодаря этому, вращающей силой, кроме лобового сопротивления, в меньшей степени является и подъемная сила. Коэффициент отбора мощности больше, чем у ветроустановок, использующих лобовое сопротивление, однако, намного ниже, чем у ветроустановок, использующих подъемную силу. При оптимальном изгибе лопастей ротора Савониуса можно достичь коэффициента отбора 0,25.

Конструкция *ротора Дарье* была запатентована французом Джорджем Дарье в 1929 году. Она состоит из двух или трех лопастей, выгнутых в форме параболы. Профиль лопастей ротора позволяет использовать, в качестве вращающей силы, подъемную силу. Коэффициент полезного действия намного выше, чем у ротора Савониуса. Основным недостатком Ротором Дарье является то, что он не может самостоятельно запускаться. Для запуска в работу ему необходима энергия привода, например, от мотора. Также отсутствует механизм контроля частоты вращения.

*Н- Ротор Дарье* представляет собой видоизмененный Ротор Дарье. Здесь вместо согнутых лопастей используются прямые лопасти, которые соединены с валом ротора удерживающими стойками.

Ветроустановки с горизонтальной осью почти на 100% пропеллерного типа. К преимуществу таких ветроустановок относят возможность изменения

угла атаки для лопастей ветроколеса, благодаря чему появляется возможность регулировать частоту вращения и выходную мощность. К тому же, изменение угла атаки дает возможность защитить ветроагрегат от экстремальных ураганов и сильных ветров. Коэффициент мощности современных ветроустановок пропеллерного типа достигает  $c_p = 0,5$ . Зачастую применяются трехлопастные ветроустановки с горизонтальной осью вращения.

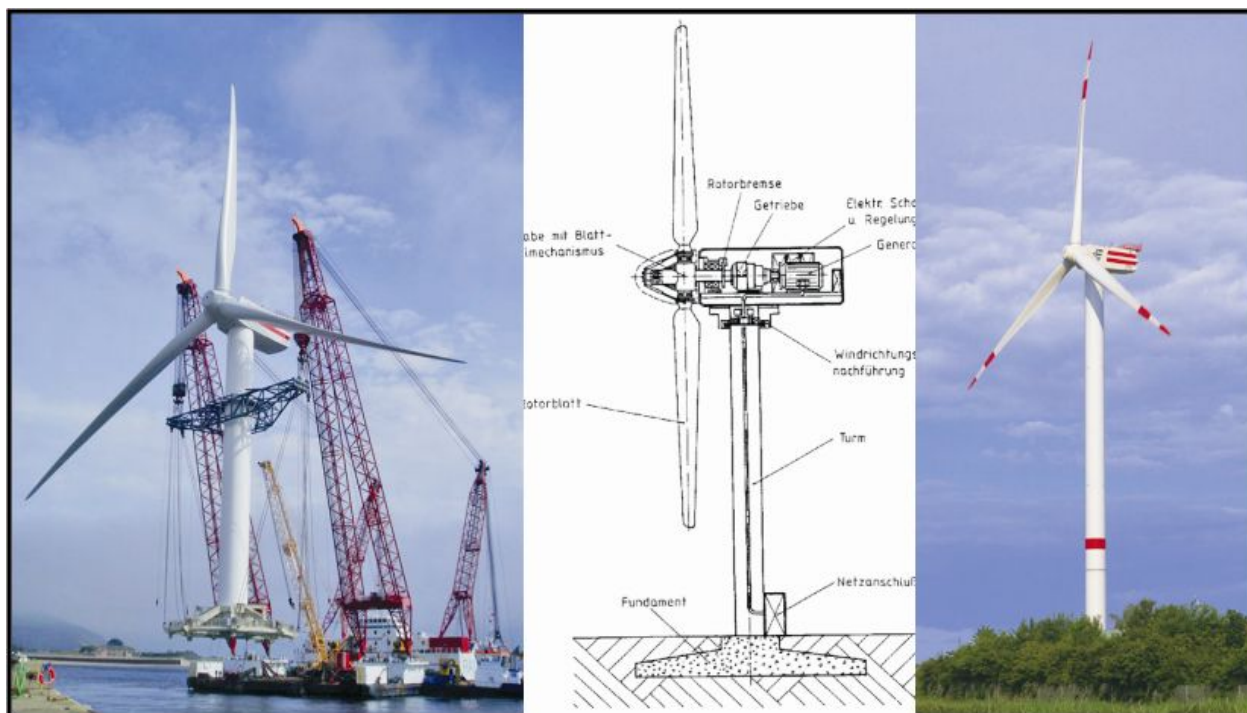


Рис.7.5 Ветроустановки с горизонтальной осью

*Концентраторы.* Мощность ветроустановки зависит от эффективности использования энергии воздушного потока. Одним из способов ее повышения является использование специальных концентраторов (усилителей) воздушного потока [Fra80]. С помощью концентраторов можно получить коэффициент отбора мощности больший, чем теоретически максимально  $c_p$  возможный коэффициент Бенца ( $c_p = 0,59$ ).

Много конструктивных решений преобразования кинетической энергии ветрового потока было предложено с помощью концентраторов. Многие конструктивные решения были опробованы экспериментально, тем не менее, практического применения они еще не нашли. Одной из основных причин является сложность аэродинамического расчета поведения ветрового потока, усложнение конструкции при незначительном увеличении выработки мощности. Среди концентрирующих ветроустановок можно выделить: трубу в канале, турбину с диффузором, вихревую трубу.

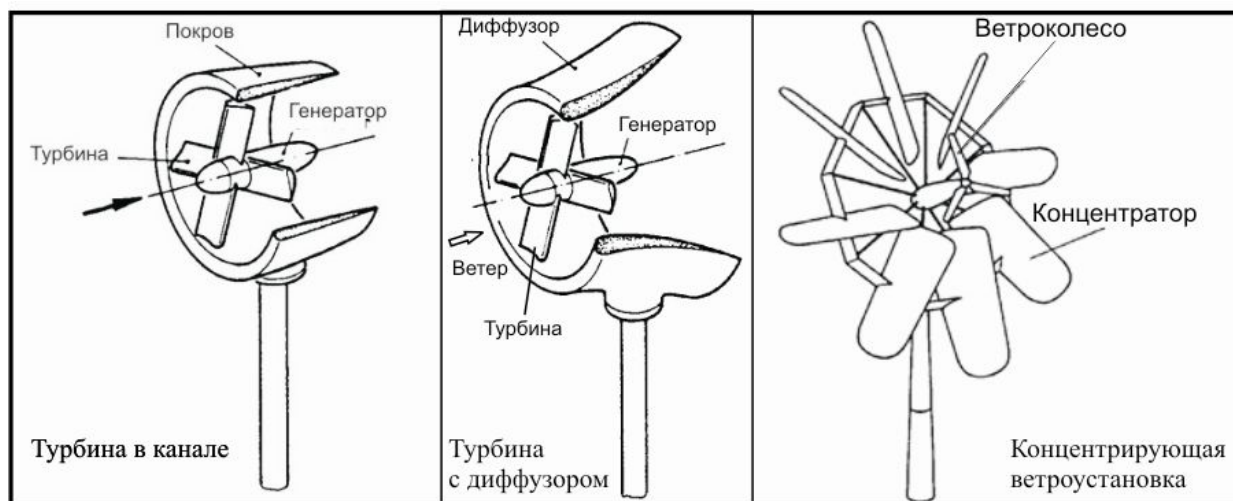


Рис.7.6 Концентрирующие ветроустановки

*Турбина в канале.* Присоединение наружного канала - наиболее простейший метод, увеличивающий коэффициент полезного действия. При свободном воздействии на ветроколеса происходит расширение потока воздуха. Канал устраняет расширение. Достижимый коэффициент мощности превосходит идеальный коэффициент мощности Бенца и равняется  $c_p = 0,66$ . Вместо канала также можно установить оторцевание на концах лопастей, которое создаст эффект канала.

*Турбина с диффузором.* Применение воронкообразного канала перед ветроколесом кажется хорошей идеей, с целью получения большего количества воздушного потока, а соответственно и энергии. Однако теоретические и экспериментальные исследования показали, что практически не происходит никакого повышения выходной мощности ветроагрегата. Очевидно, что расход воздуха, проходящего через воронкообразный канал, определяется со стороны меньшего диаметра воронки, и кроме того, воронка создает циркуляционный поток, направленный в противоположную сторону основного потока.

Диффузор представляет собой воронкообразный канал и является причиной возникновения дополнительного циркулирующего потока, скорость которого имеет такое же направление, что и основной поток, который благодаря этому усиливается. Коэффициент мощности ветроколеса колеблется в пределах 2,0 до 2,5 относительно площади ветроколеса. Правильней, наверное, считать коэффициент мощности относительно большего выходного сечения. В этом случае коэффициент мощности уменьшается до 0,75, но, тем не менее, также дает выигрыш по сравнению с ветроагрегатами со свободным потоком.

*Концентрирующая ветроустановка.* Техническим университетом Берлина был предложен другой вариант ветрового концентратора. Он известен под названием концентратор Бервиана. С помощью неподвижного направляющего колеса, состоящего из множества лопаток, создаются в центре концентратора сильные вихри. Небольшая ветровая турбина,

находящаяся в центре направляющего аппарата, использует ветровой поток увеличенной в шесть или восемь раз мощности. Внутри ветрового канала, а также в реальных условиях было испытано много разных вариантов. Эксперименты подтвердили возможную концентрацию мощности ветрового потока. Одной из проблем является обеспечение безопасности направляющего аппарата во время шторма. Для того, чтобы не допустить сильное повышение силы ветра, лопасти направляющего колеса должны быть подвижными. Это делает конструкцию капиталоемкой.

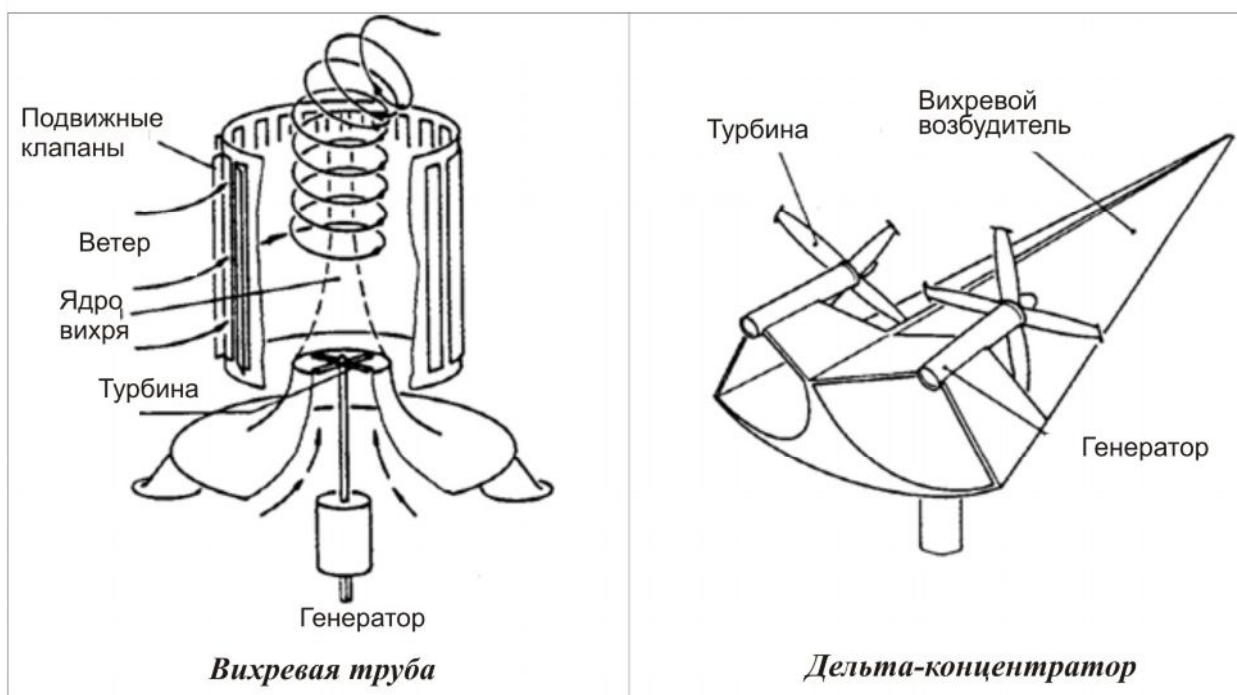


Рис.7.7 Концентрирующие ветроустановки

*Вихревая труба.* Благодаря напластованию стационарных вихрей по ветровому потоку так, что их поле скоростей приводит к воздействию на ветроколесо, можно добиться концентрации ветрового потока. Существует много различных конструктивных решений по использованию этого эффекта. Одна из идей воплощена в конструкцию под названием вихревая труба или труба Торнадо.

Воздушный поток направлен тангенциально во внутреннюю часть ветроагрегата с цилиндрическим обрамлением и упорядоченными на ней клапанами, благодаря чему создается торнадообразный воздушный вихрь. Из-за сильного разрежения в центре воздушного вихря, создается засос воздуха через нижнюю часть установки. Затянутый воздушный поток, проходя через лопасти ветроагрегата, приводит его во вращение и тем самым к выработке энергии. Диаметр цилиндра на 1/3 меньше диаметра внутреннего отверстия установки, откуда происходит всасывание воздуха. Ранее этот принцип был исследован на экспериментальном ветровом канале. Для создания же большой установки, требуется решить большое количество проблем. Одной из таких сложных проблем является возникновение



сильного шороха. Кроме этого теоретические исследования показали, что коэффициент мощности, относительно максимальной видимой площади всей конструкции, достигает лишь 0,1.

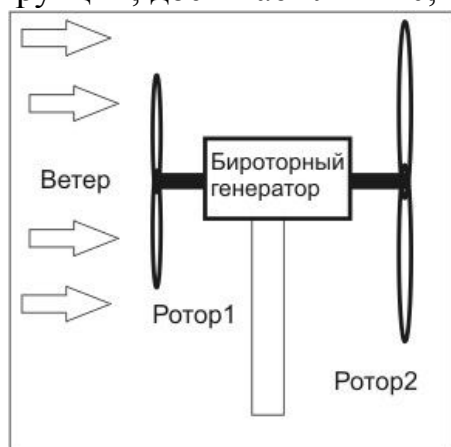


Рис.7.8 Биколесная (бироторная установка)

*Вихревая концентрация с помощью «треугольного крыла».* Концентрированные вихревые потоки, так называемые концевые вихри, возникают при обтекании крыла воздушным потоком. Особенно ярко это явление наблюдается у треугольного крыла с большим углом наклона. Было опробовано перенести этот эффект на ветровые установки.

На стационарной конструкции, выполненной в форме треугольного крыла, установлены ветроагрегаты так, что они работают от концевых вихрей. По теоретическим расчетам ожидалось получить в 10 раз больше выходной мощности по сравнению с традиционными ветроагрегатами. В данном случае надежная теория подвела. В заключительном отчете данного проекта было отмечено, что измеренные данные, полученные с экспериментальной установки, были разочарованием для них.

Биколесная ветроустановка. Одной из научных разработок ученых КР является биколесная ветроустановка [ОАД07]. В биколесной ВЭУ, в отличие от традиционной, происходит одновременное встречное вращение роторов, где частота пересечения магнитным полем ротора 1 витков обмотки ротора 2, увеличивается по абсолютной величине. Принцип независимости вращения ротора 1 к ротору 2 осуществлен при помощи дополнительных подшипниковых опор и дополнительного вала. Дополнительный вал прикреплен в задней части генератора и установлен на скользящей опоре. Таким образом, генератор с двумя роторами, которые имеют степень свободы относительно друг друга, и стали на ветроустановки. Роторы 1 и ротор 2 жестко связаны с ветроколесами, которые взаимодействуют с ветровым потоком, преобразуют линейную скорость ветра в угловую ротора 1 и ротора 2. Ветроколеса имеют лопасти с противоположными углами атаки, что обеспечивает противоположно направленные вращающие моменты. Таким образом, получаем увеличенную угловую скорость пересечения магнитным полем ротора 1 витков обмотки ротора 2. Увеличение скорости вращения позволяет сократить количество пар полюсов на генераторе, а соответственно уменьшить габариты и стоимость. Коэффициент отбора данной установки выше 0,59 в связи с тем, что фактический отбор мощности одной ветроустановкой осуществляется в двух разных плоскостях.

## 7.6 Регулирование мощности и аварийное отключение при ураганах

В зависимости от скорости ветра, ветроколесо отбирает различную мощность от воздушного потока. Скорость ветра, при которой ветроколесо начинает вращение без нагрузки, называется *скоростью страгивания с места*. Запуск ветроустановки не целесообразен при подобных скоростях. Во-первых, ветроустановка практически ничего не вырабатывает, а иногда может даже работать в режиме двигателя. Запуск ветроустановки начинается при достижении скорости ветра отметки минимальной рабочей скорости ветра. *Минимальной рабочей скоростью ветра* называется минимальная скорость ветра, при которой обеспечивается вращение ветроагрегата с номинальной частотой вращения с нулевой производительностью (холостой ход). *Оптимальной скоростью ветра* ( $v_{opt}$ ) называется скорость вращения ветроустановки, при которой достигается оптимальный коэффициент быстроходности ветроколеса, т.е. наблюдается максимальный коэффициент мощности (рис.7.9). При оптимальной скорости ветра ветроустановка работает с максимальным КПД. Оптимальная скорость ветра особенно важна для ветроустановок с постоянным числом вращения ветроколеса.

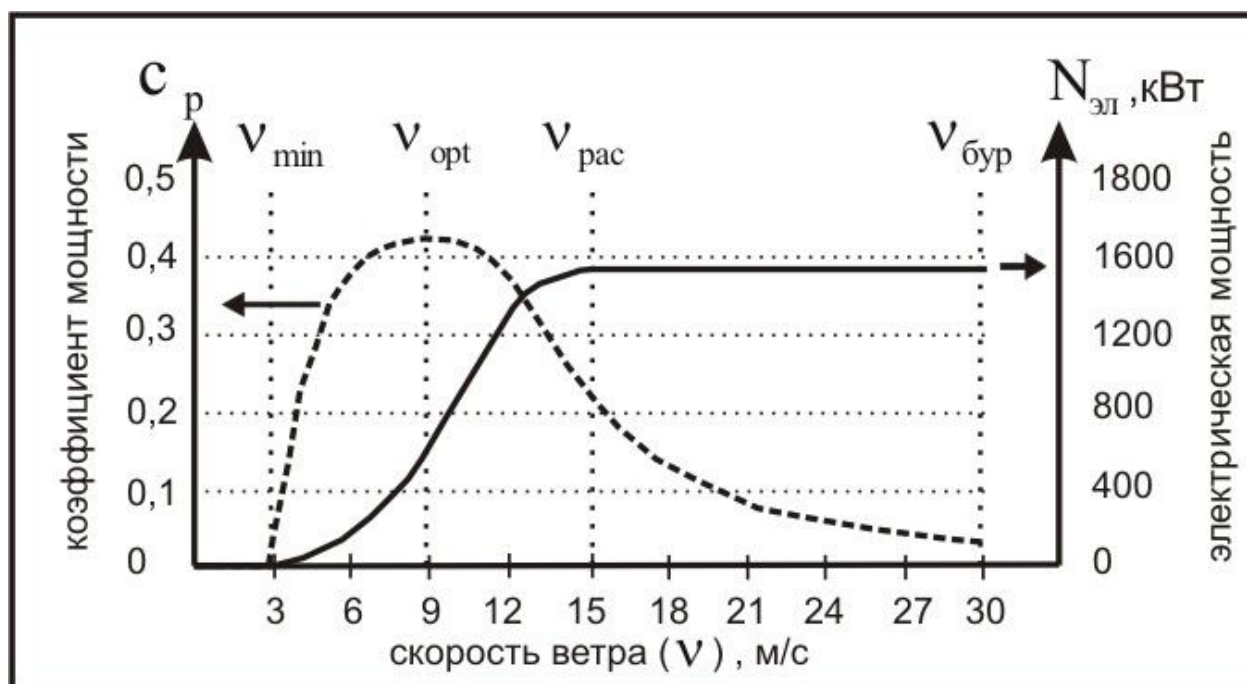


Рис.7.9 Зависимость вырабатываемой мощности и коэффициента мощности ветроколеса от скорости ветра

*Расчетная скорость ветра* - минимальная скорость ветра, при которой ветроагрегат развивает номинальную мощность: скорость, соответствующая началу регулирования. Как видно из рис. 7.9, расчетная скорость превышает оптимальную скорость ветра. Это связано с тем, что вырабатываемая мощность пропорциональна кубу скорости, а так же от частоты распределения скоростей, поэтому находится оптимум что бы ветроколес *Максимальная рабочая скорость ветра* – скорость ветра, при которой расчетная прочность ветроагрегата позволяет производить электроэнергию

без повреждений. *Буревая расчетная скорость ветра* – максимальная скорость ветра, которую может выдержать остановленный ветроагрегат без разрушений. В табл.7.4 приведены характеристики скоростей ветра.

Табл.7.4

Ветровые характеристики ветроколеса

Наименование	Обозначение	Скорость, м/с
Скорость срагивания с места	$v_{cnp}$	До 2,5
Минимальная рабочая скорость ветра	$v_{min}$	2,5 ÷ 4,5
Оптимальная скорость вращения	$v_{opt}$	6,0 ÷ 10
Расчетная скорость ветра	$v_{pac}$	10 ÷ 15
Максимальная рабочая скорость ветра	$v_{max}$	20 ÷ 34
Буревая расчетная скорость ветра	$v_{бур}$	50 ÷ 70

Ветроагрегат достигает своей номинальной выработки при достижении расчетной скорости ветра. Номинальная мощность ветроагрегата должна поддерживаться и при скоростях выше расчетной скорости, во избежание перегрузки и повреждения как генератора, так и ветроустановки. Поэтому при высоких скоростях ветроустановку необходимо отключать.

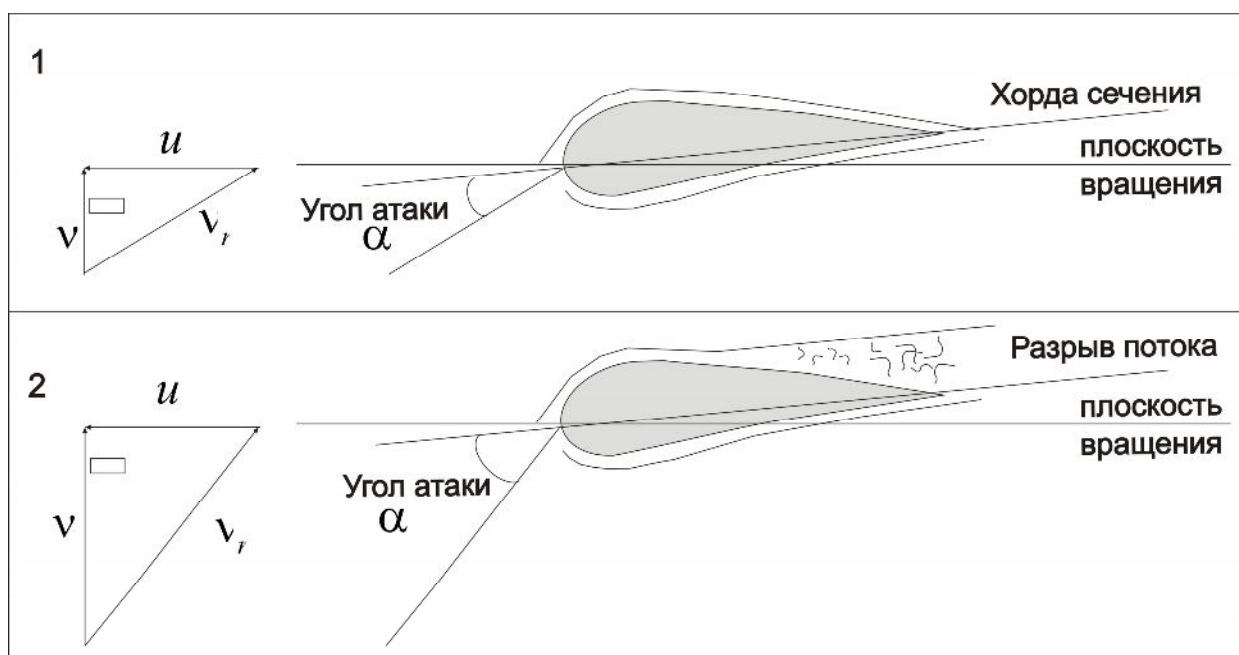


Рис. 7.10 Регулирование мощности с помощью Шталь регулирования

На практике различают два основных способа поддержания постоянной вырабатываемой мощности ветроколеса при скоростях больше расчетной скорости ветра:

- *Шталь регулирование (Stall regulation)*
- *Питч регулирование (Pitch regulation)*

Шталь регулирование основано на особенности профиля лопастей ветроколеса [Hei06]. При больших углах атаки ( $\alpha$ ) происходит естественный разрыв ветрового потока, что приводит к уменьшению подъемной силы на лопасти ветроколеса. Таким образом, происходит ограничение мощности при повышенных скоростях ветрового потока. Шталь регулирование поддерживает постоянное число оборотов и соответственно окружную скорость вращения лопастей. Подобное регулирование относится к пассивному регулированию, в котором тяжело предсказать максимальную регулируемую мощность.

На рис.7.11 [Hei06] изображено изменение угла атаки на ветроколесо вследствие повышения скорости  $v$  набегающего на ветроколесо потока. Однако, скорости вращения лопасти ветроколеса остается постоянной по причине разрыва потока и уменьшения подъемной силы. Подобное регулирование, называемое шталь регулированием, имеет недостатки: после достижения номинальной мощности, при повышении скорости ветра вырабатываемая мощность сначала падает, а не поддерживается постоянной (рис.7.12). Поэтому шталь регулирование применяется для относительно маленьких ветроагрегатов.

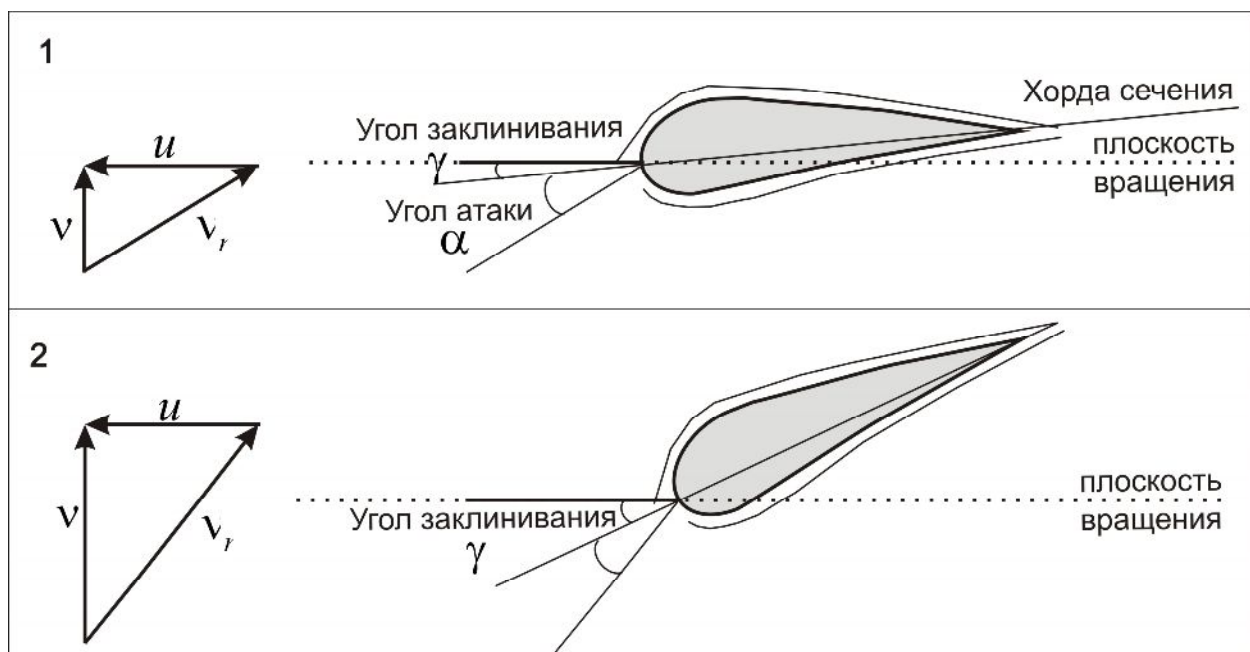


Рис. 7.11 Питч регулирование мощности ветроколеса

*Питч регулирование* осуществляется за счет поворота лопастей ветроколеса, то есть изменения угла заклинивания ( $\gamma$ ). Для больших ветроагрегатов применяется в основном питч регулирование. Поворот лопастей ветроагрегата осуществляется за счет отдельных электромоторов, которые позволяют изменять угол заклинивания. Конструкции подобных ветроагрегатов являются более сложными и материалоемкими за счет подвижности лопастей. Активное регулирование с помощью изменения угла заклинивания позволяет поддерживать вырабатываемую мощность на



относительно постоянном уровне. На рис.7.12 [DWE] представлено сравнение выработки электрической энергии в процентном соотношении для питч и шталь регулирования соответственно.

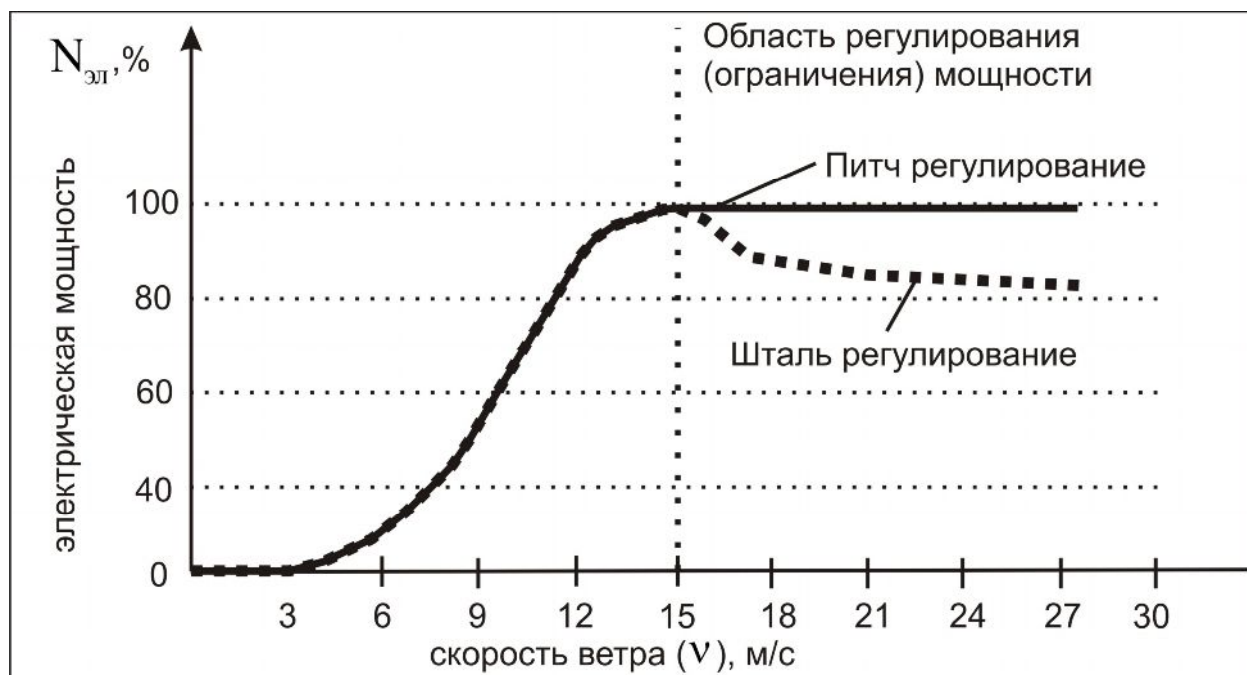


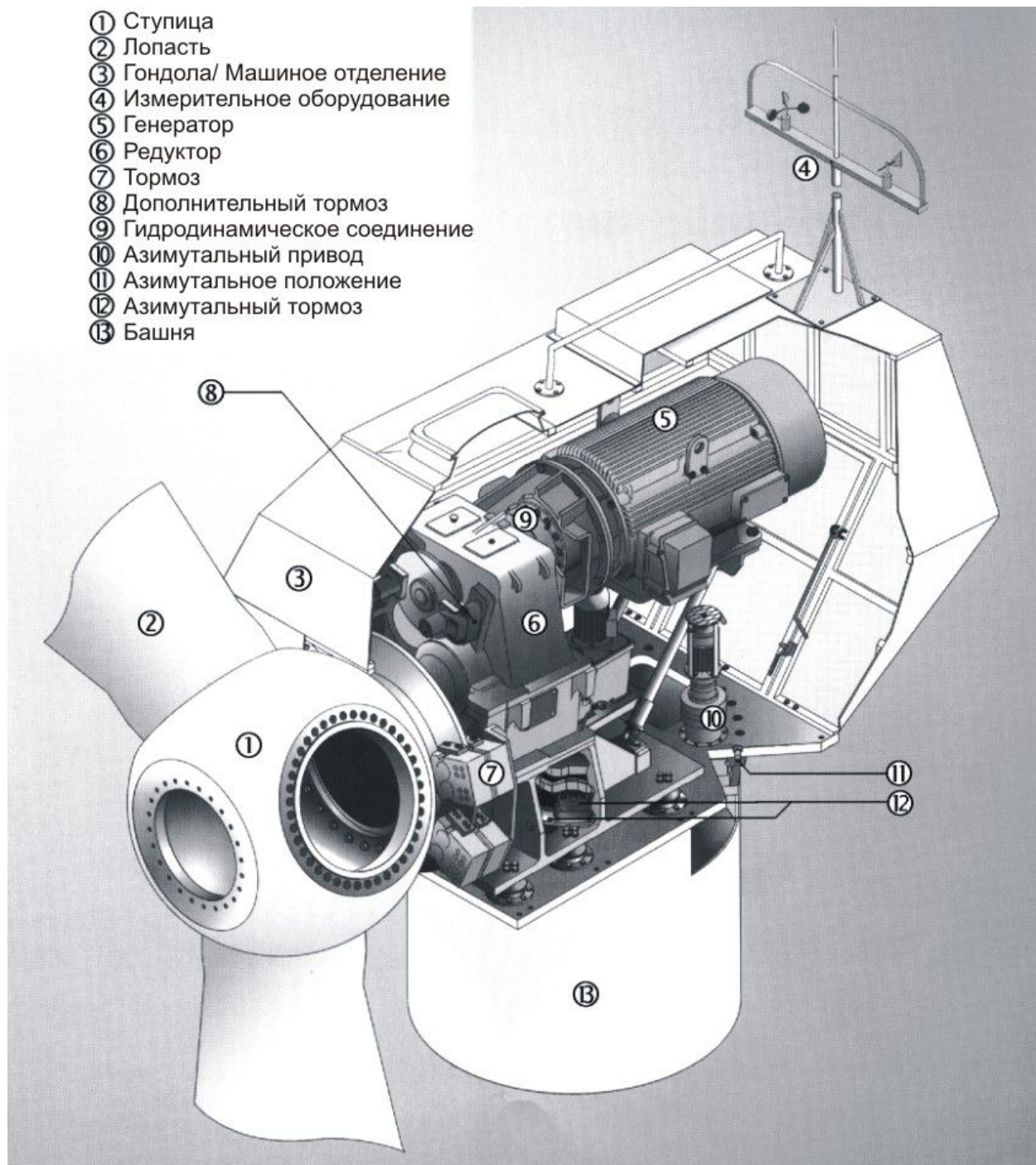
Рис.7.12 Питч и Шталь регулирование вырабатываемой мощности

## 7.7 Компоненты трехлопастной ветроустановки

Широкое распространение для выработки электричества получили ветроустановки с горизонтальной осью вращения. Среди подобных установок в большинстве преобладают трехлопастные ветроустановки, разрез которых показан на рис.7.13 [Qua07]. Ветроустановка состоит из следующих компонентов:

*В гондоле* 1 находятся ключевые компоненты ветроустановки: редуктор и генератор. Обслуживающий персонал при необходимости может подняться в гондолу по лестнице, расположенной внутри *башни*. Гондола автоматически поворачивается с помощью азимутальных приводов против ветра.

*Генератор* является компонентом, который преобразовывает механическую энергию вращения в электрическую. Для ветроустановок применяются синхронные и асинхронные генераторы.



- ① Ступица
- ② Лопасть
- ③ Гондола/ Машиное отделение
- ④ Измерительное оборудование
- ⑤ Генератор
- ⑥ Редуктор
- ⑦ Тормоз
- ⑧ Дополнительный тормоз
- ⑨ Гидродинамическое соединение
- ⑩ Азимутальный привод
- ⑪ Азимутальное положение
- ⑫ Азимутальный тормоз
- ⑬ Башня

Рис.7.13 Компоненты трехлопастной ветроустановки

Основное отличие асинхронных генераторов заключается в неравенстве частот вращения ротора и поля в воздушном зазоре. Магнитное поле в воздушном потоке создается за счет потребления реактивной мощности из сети. В генераторном режиме ротор вращается в ту же сторону, что и поле, но с большей частотой вращения. Параметр  $s$ , характеризующий разность частот вращения ротора и вращающегося поля статора, называется *скольжением*:

$$s = \frac{n_c - n_p}{n_c}, \quad (7.30)$$

где  $n_c$  - частота вращения поля статора, об/мин;  $n_p$  - частота вращения ротора, об/мин.

В настоящее время синхронные генераторы получили большое распространение.

*Одним из существенных недостатков асинхронных генераторов является значительная реактивная мощность, потребляемая ими из сети. Величина этой мощности пропорциональна намагничивающему току и может достигать 25 – 45 % от номинальной мощности машины [Кац67].*

Редуктор 6 компонент ветроустановки, который связывает ветроколесо (ротор) с генератором. Редуктор повышает частоту вращения вала генератора. Альтернативой редуктору могут служить многополюсные генераторы. Если частота вращения ветроколеса совпадает с номинальной частотой вращения генератора, то редуктор не устанавливают. На практике все ветроустановки большой мощности являются тихоходными, поэтому для них необходим редуктор.

Лопастей 2 ветроколеса служат для преобразования энергии ветрового потока. Например, лопасти ветроустановки 600 кВт достигают 20 м в длину. От длины лопасти зависит отметаемая площадь ветроколеса, соответственно и вырабатываемая мощность.

Измерительное оборудование 4 служит для сбора и анализа метеорологических условий. Данные непрерывно передаются управляющему компьютеру. На рисунке непосредственно изображены анемометр и флюгер для измерения скорости ветра и его направления

Тормоз 7 компонент ветроустановки, который выводит ее из эксплуатации. При буревых скоростях или по причине аварийных ситуаций ветроустановку останавливают при помощи тормозов (основных и дополнительных).

Азимутальный привод 10 служит для направления ветроустановки против ветра. По данным флюгера осуществляется автоматический привод и соответственно поворот гондолы.

## **7.8 Подключение ветроустановок к электрическим сетям**

Современные ветроустановки в основном используются для производства переменного электрического тока. Вырабатываемая мощность может непосредственно питать отдельные нагрузки и выдаваться в электрическую сеть. На практике используются различные концепции подключения ветроустановок к электрическим сетям, среди них можно выделить *прямое и не прямое подключение.*

При *прямом подключении* ветроустановок к электрическим сетям частота вращения ротора синхронного и асинхронного генераторов поддерживается постоянной (частота вращения ротора асинхронного генератора за счет скольжения может частично изменяться). Подобное подключение, особенно для ветроустановок с синхронными генераторами,

может вызывать динамические перегрузки на валу, редукторе и ветроагрегате в целом.

*Непрямое подключение* позволяет эксплуатацию ветроустановок с переменной частотой вращения ротора (ветроколесо). *Переменная частота вращения ротора вырабатывает переменный ток различной частоты, поэтому для выдачи ее в сеть необходимо применение частотного преобразователя.* Электрический ток переменного напряжения и частоты, выработанный генератором, сначала выпрямляется, а затем с помощью инвертора трансформируется на необходимые напряжение и частоту. Основным преимуществом такого подключения является то, что регулируемой частотой вращения ротора можно аэродинамически оптимально эксплуатировать ветроустановку при разных скоростях ветра. Другое преимущество - это устранение динамических перегрузок наблюдаемых при прямом подключении. Недостатками являются дополнительные затраты и значительные электрические потери.

Одна из концепций прямого подключения, известная как «Датская концепция», распространяется на большинство ветроагрегатов малых и средних мощностей, произведенных в Дании. Концепция предусматривает подключение асинхронного ветрогенератора к электрическим сетям (рис.7.14) [DWE]. Асинхронный генератор не должен быть синхронизирован с электрической сетью, так как частота будет равна частоте тока возбуждения, т.е. тока сети. Ограничение мощности, во избежание перегрузок ветроагрегата, осуществляется с помощью пассивного шталь регулирования.

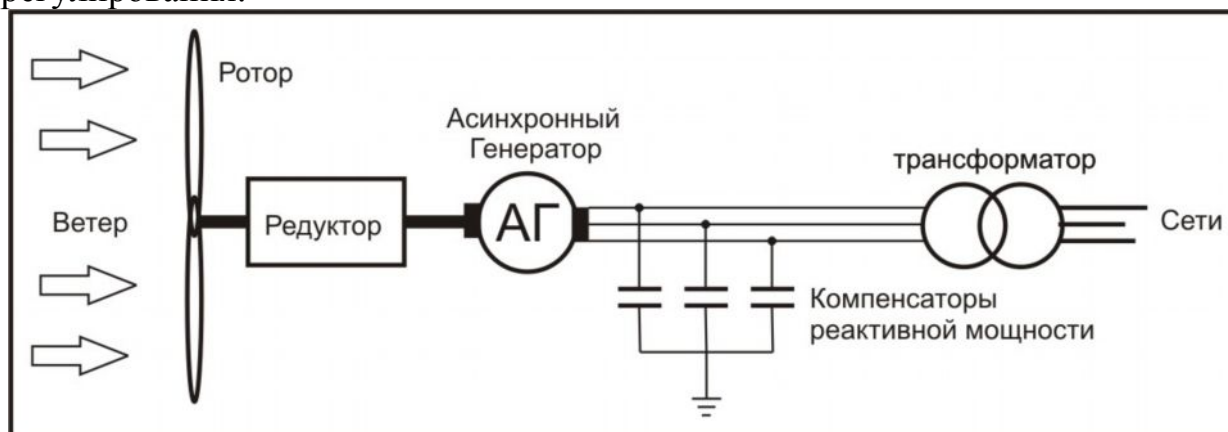


Рис.7.14 Концепция подключения асинхронного ветрогенератора к сети

Быстрое изменение скорости ветра компенсируется асинхронным генератором, а именно изменением скольжения. Для подобных ветроагрегатов возможно изменение частоты вращения в пределах 10%. При больших значениях скольжения наблюдаются большие потери, что приводит к уменьшению КПД ветроустановок. По этой причине были разработаны новые асинхронные генераторы с переменным скольжением. У конструкций таких генераторов применяется не короткозамкнутый ротор, а ротор с регулируемым сопротивлением. Регулируемое сопротивление может



совместно вращаться с ротором или быть соединенным с обмотками ротора, выведенных наружу через контактное кольцо.

Эффективность подключения асинхронного генератора к электрической сети может быть оценена по графику зависимости мощности, развиваемой ветрогенератором, от частоты вращения ветроколеса (рис.7.15, [Hei06]).

Вырабатываемая мощность ветроколеса, как было уже указано выше, определяется по формуле:

$$N_B = \frac{c_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (7.31)$$

Коэффициент мощности может быть описан через коэффициент быстроходности полиномом третьей степени:

$$c_p = a_3 \cdot z^3 + a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0 \quad (7.32)$$

где  $z$  - коэффициент быстроходности;  $a_3, a_2, a_1, a_0$  - параметры полинома, определяемые по измерительным данным для данной ветроустановки.

Коэффициент быстроходности ветроустановки - отношение

$$z = \frac{u}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v} \cdot n, \quad (7.33)$$

где  $\pi=3,14$  отношение длины окружности к диаметру;  $r$  - радиус ометаемой площади ветроколесом, м;  $n$  - частота вращения ветроколеса, об/с.

На рис. 7.15 слева представлен график мощности ветроагрегата в зависимости от частоты вращения ротора при постоянных скоростях ветра. Как видно из рисунка, от частоты вращения ветроколеса зависит количество отбираемой мощности от ветропотока. В связи с постоянной частотой вращения ветроколеса невозможно максимально преобразовывать мощность ветра в широком диапазоне скоростей. Ветровые потоки со скоростью менее 4 м/с не достаточны для преобразования в электрическую энергию, в связи с высокой частотой вращения ветроколеса. При скоростях ветра 8 м/с достигается максимальное преобразование кинетической энергии потока. При дальнейшем повышении скорости набегающего потока процентное соотношение максимально возможного количества отбираемой мощности падает.

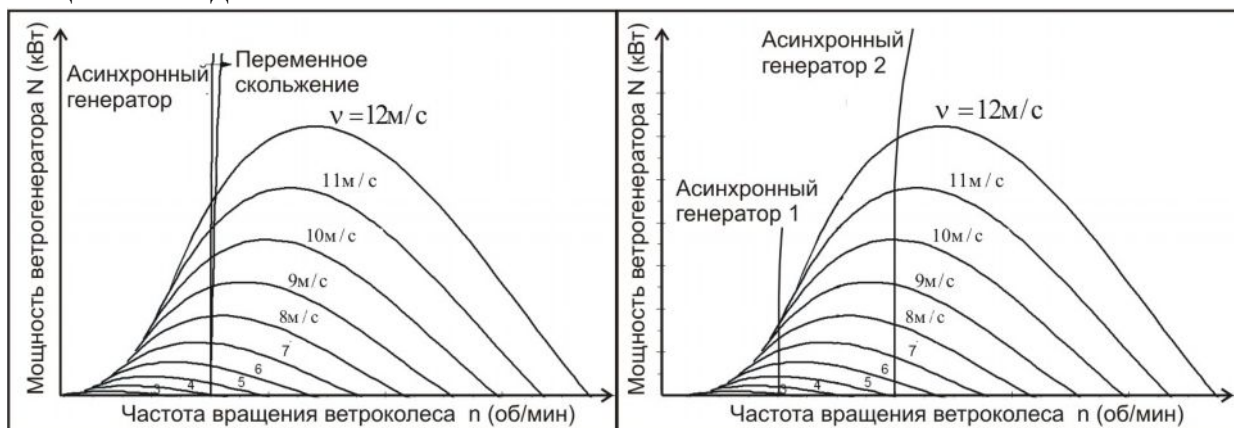


Рис. 7.15 Зависимость мощности от частоты вращения ветроколеса

На рис.7.15 (справа) показана другая концепция, предполагающая использовать две различные частоты вращения ветроколеса. Реализация данного подхода возможна путем последовательного подключения двух различных асинхронных генераторов. Другая возможность - это использование многоскоростного генератора. Две обмотки статора такого генератора имеют различное количество пар полюсов. Как известно, частота вращения магнитного поля генератора была трансформирована редуктором, создана ветроколесом (ротором) и зависит от количества пар полюсов. Два возможных варианта эксплуатации асинхронного генератора с разным количеством пар полюсов предполагает наличие двух разных частот вращения ротора. Подобным образом достигается возможность работы генератора с оптимальным отбором кинетической энергии ветра в расширенном диапазоне скоростей ветра. Первый асинхронный генератор работает при скоростях ветра от 3 м/с до 6 м/с, а при скоростях выше 7 м/с он отключается, и подключают второй асинхронный генератор.

Для уменьшения потребления реактивной мощности из сети необходимо подключение емкостных компенсирующих устройств. Современная силовая полупроводниковая техника позволяет также регулировать реактивную мощность.

Ветроустановки с асинхронным генератором могут работать и в автономных условиях, т.е. без включения в общую сеть. Но в этом случае для получения реактивной мощности, необходимой для намагничивания генератора, используется батарея конденсаторов, включенная параллельно нагрузке на выводы генератора. Непременным условием такой работы асинхронных генераторов является наличие остаточного намагничивания стали ротора, что необходимо для процесса самовозбуждения генератора. Изменением емкости конденсаторов можно изменять величину намагничивающего тока, а, следовательно, и величину напряжения генераторов.

Другая концепция - использовать ветроустановку с синхронным генератором (рис.7.16) [Hei06], где отсутствует потребность реактивной мощности. Возбуждение синхронного генератора может осуществляться двумя способами: возбуждение постоянными магнитами и электромагнитное. При первом невозможно регулирование реактивной мощности и сложно совершать регулировку ЭДС генератора.

Другим недостатком является относительная дороговизна постоянных магнитов. В связи с данными недостатками на практике применяется электромагнитное возбуждение. С помощью тиристорных преобразователей трансформируется переменный ток сети в необходимый постоянный ток, который используется для возбуждения.

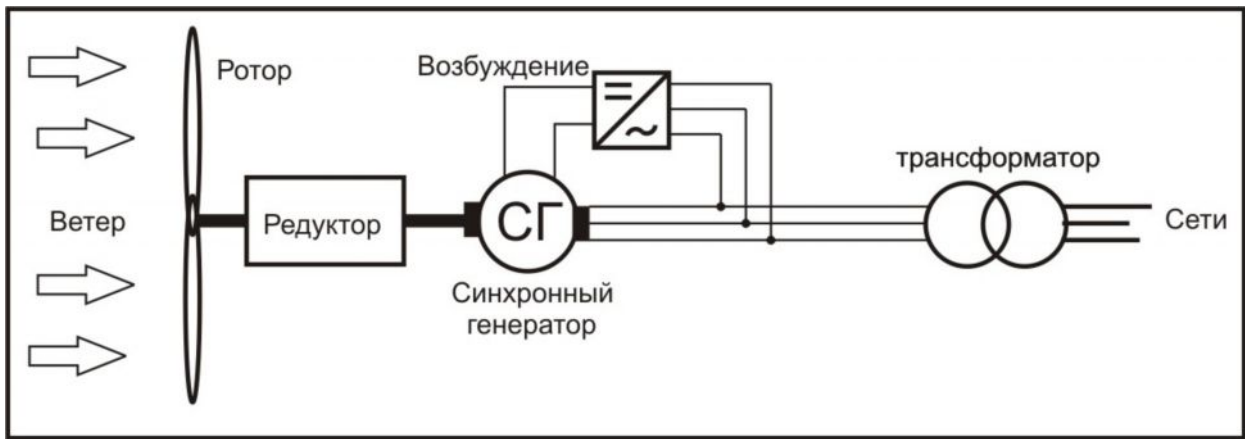


Рис.7.16 Прямое подключение ветроустановки с синхронным генератором

В отличие от асинхронных, синхронные генераторы имеют постоянную скорость вращения при данной частоте, не зависящую от нагрузки. Зависимость мощности ветроагрегата от частоты вращения при постоянных скоростях ветра выглядит в виде прямой линии, тогда как у асинхронных генераторов имеется искривление при повышенных скоростях ветра. Скачки нагрузки не могут быть компенсированы скольжением, а передаются дальше электрической сети. Помимо перегрузки сети имеются и механические перегрузки ветроустановки. По этим причинам прямое подключение ветроустановок к сетям применяется редко. Ветроустановки с синхронным генератором могут работать и в автономном режиме для питания двигателей, насосов и активных нагрузок.

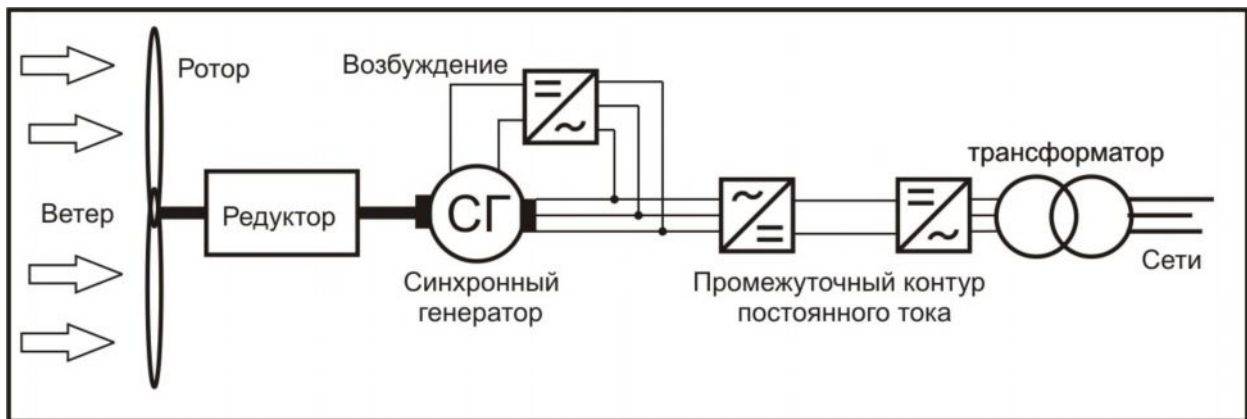


Рис.7.17 Подключение ветроустановки с синхронным генератором через силовую технику.

Недостатки прямого подключения ветроагрегатов к электрической сети могут быть устранены с помощью современной силовой полупроводниковой техники. На рис. 7.17 показана концепция подключения ветроустановки с синхронным генератором к электрической сети через выпрямитель и частотный преобразователь. Генератор может быть настроен на частоту, отличную от частоты сети. Это позволяет для различных скоростей ветра

подбирать подходящую частоту вращения ротора для оптимального использования кинетической энергии ветрового потока.



Рис.7.18 Мощность ветрогенератора в зависимости от частоты вращения ветроколеса

Как видно из рис.7.18 [Неі06], кривая 2 при низких скоростях ветра, возможно оптимальное использование ветрового потока путем изменения скоростей вращения ротора.

Возможность эксплуатации генератора с переменной скоростью вращения позволяет создавать ветроустановки без редуктора, который предназначен для подгонки частоты вращения ветроколеса с частотой генератора. Подобные конструкции ветроустановок мегаваттных мощностей выпускаются промышленностью. Синхронные генераторы к ним имеют более 80 пар полюсов. Эти установки, помимо экономии на редукторе, а, следовательно, и на всей установке, являются также менее шумными.

Как уже было показано выше, при прямом подключении ветроустановки с асинхронным генератором с помощью скольжения можно изменять скорость вращения ротора. Однако, высокое значение коэффициента скольжения приводит к большим потерям, поэтому скольжение менялось в пределах до 10%. Через дополнительный контур и инвертор можно также использовать ток ротора генератора и выдавать его в сеть (рис.7.19).



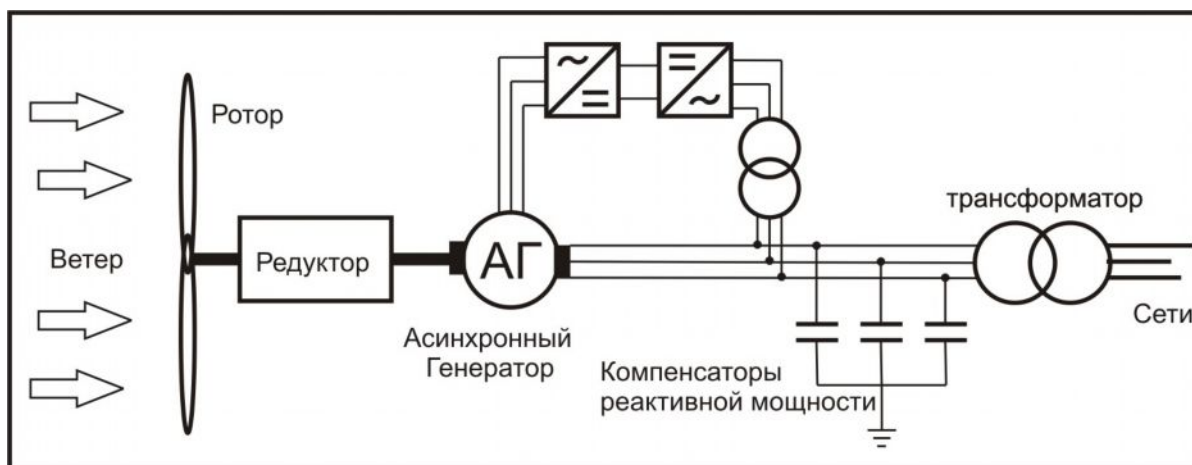


Рис.7.19 Подключение ветроустановки с асинхронным генератором через инвертор и дополнительный контур.

## 7.9 Ветроферма

*Ветроферма* (ветропарк) - это совокупность ветроустановок, концентрированно сосредоточенных в определенной местности.

Месторасположение ветроустановок в ветроферме относительно друг друга выбирается не случайно, а с учетом многих факторов: экологических, метеорологических и топографических. Ветроустановка представляет собой препятствие для ветрового потока, где помимо уменьшения энергии за ветроколесом наблюдается его турбулентность. На рис.7.20 [DWE] представлен аэродинамический след ветрового потока за плоскостью вращения ветроколеса.

Ветровой поток за плоскостью ветроколеса замедлен и турбулентен, поэтому *при проектировании ветрофермы расстояние между ветроустановками должно быть не менее трех диаметров ветроколеса*. С энергетической стороны значительное расстояние между ветроустановками благоприятно для ветропарка, однако отдаленность друг от друга удорожает их подключение к электрическим сетям.



Рис.7.20 Аэродинамический след ветрового потока за плоскостью ветроколеса

Различают два основных метода выбора месторасположения ветроустановок на ограниченной территории с учетом минимизации эффекта заграждения. Первый метод идет с учетом привязки к основному направлению ветра, а второй - без учета основного направления ветра (рис.7.21). Расстояние между соседними ветроустановками обычно определяется значением, кратным диаметру  $d$  ветроколеса.

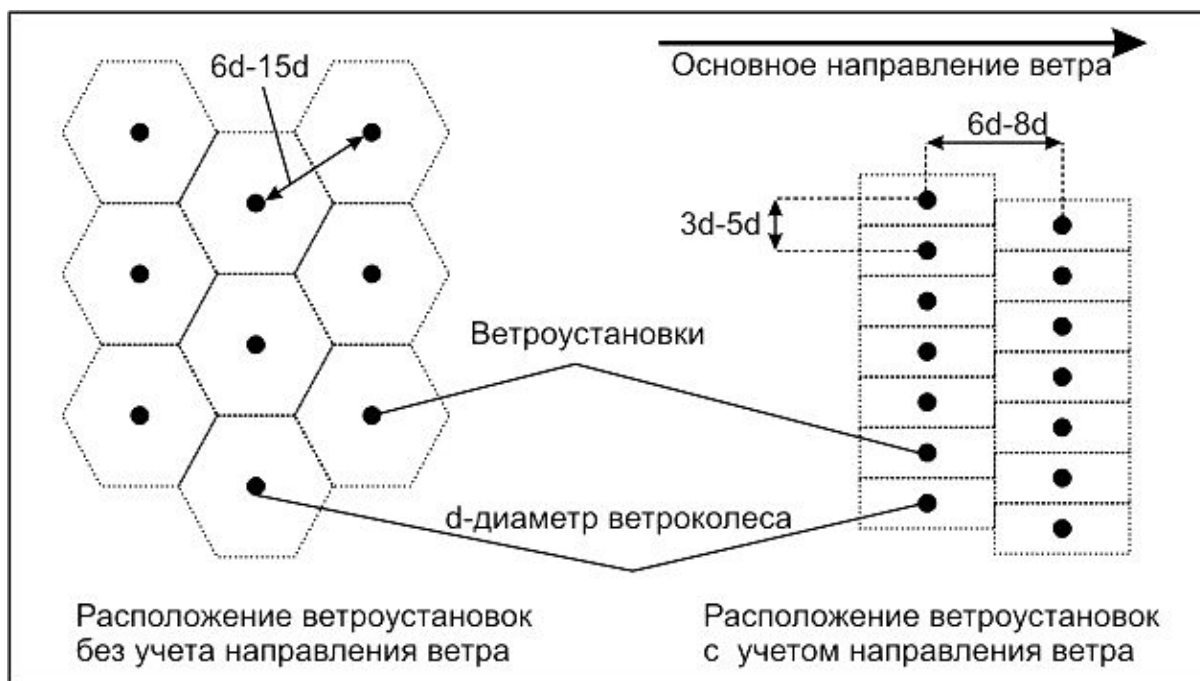


Рис.7.21 Расположение ветроустановок в ветропарке, с учетом основного направления ветра и без него

На ветроферме, расположенной на побережье или на равнинной местности, где по данным наблюдений, а точнее, по розе ветров, известно основное направление ветра, используется расположение ветроустановок, показанное на рис.7.21 (справа). Подобное месторасположение предполагает минимизацию эффекта заграждения относительно основного потока ветра, и как следствие расстояние между установками вдоль основного направления ветра принимается равным шести, восьми диаметрам ветроколеса. Расстояние между ветроустановками, перпендикулярно расположенными по отношению к направлению ветра, равно трем, пяти диаметрам ветроколеса.

Если ветроферма расположена на относительном расстоянии от моря, в местности, где в течение года наблюдается различное направление ветра, то применяется расстановка ветроустановок, показанная на рис. 7.21 (слева). Эффект заграждения учитывается для любого направления ветра, и как следствие, расстояние между близлежащими ветроустановками одинаковое. В зависимости от внешних условий расстояние между ветроустановками колеблется от 6 до 15 диаметров ветроколеса.

## 7.10 Вопросы для самоконтроля и примеры решения задач

1. Почему возникает ветер?
2. Что такое шкала Бофорта?
3. Чем измеряется скорость ветра?
4. Что такое относительная шероховатость местности?
5. Что такое коэффициент мощности?
6. Как называется максимальный коэффициент мощности и чему он равен?
7. Классификация ветроустановок.
8. Компоненты, из которых состоит трехлопастная ветроустановка.
9. Что такое гондола?
10. Как осуществляется ограничение мощности ветроустановок?
11. Какие концепции подключения ветроустановок Вы знаете?

*Задача №1.* Дана трехлопастная ветроустановка, диаметр ветроколеса которой равен 80 м. Скорость ветра 5 м/с, температура окружающего воздуха 20 °С ( $\rho_{\text{воз}} = 1,188$  кг/м<sup>3</sup>). Коэффициент отбора мощности принять равным 0,45. Определить:

- 1) мощность, развиваемую ветроустановкой;
- 2) во сколько раз понизится мощность, развиваемая ветроустановкой, если скорость ветра уменьшится на 20%;
- 3) мощность ветроколеса, если диаметр ветроколеса увеличить на 25%;
- 4) на сколько процентов повысится мощность, развиваемая ветроколесом, если температура воздуха будет – 20 °С ( $\rho_{\text{воз}} = 1,377$  кг/м<sup>3</sup>).

*Решение:*

1. Мощность, развиваемая ветроустановкой, определяется по формуле

$$N_B = \frac{c_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3}{2} = \frac{0,45 \cdot 1,188 \cdot 5024 \cdot 5^3}{2} = 167864,4 \text{ (Вт)},$$

причем площадь, ометаемая ветроколесом,  $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 80^2}{4} = 5024 \text{ (м}^2\text{)}$ .

2. Мощность, развиваемая ветроколесом, если скорость понизилась на 20%:

$$N_{B2} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3}{2} = \frac{0,45 \cdot 1,188 \cdot 5024 \cdot (0,8 \cdot 5)^3}{2} = 0,512 \cdot 167864,4 = 85946,573.$$

Понижение мощности, развиваемой ветроустановкой за счет уменьшения скорости:

$$k = \frac{N_B}{N_{B2}} = \frac{167864,4}{0,512 \cdot 167864,4} = 1,95.$$

3. Мощность, развиваемая ветроустановкой за счет увеличения диаметра на 25%

$$N_{B3} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot A_3 \cdot v_3^3}{2} = \frac{0,45 \cdot 1,188 \cdot 7850 \cdot 5^3}{2} = 263288,13 \text{ (Вт)},$$

где площадь ометаемая ветроколесом,  $A_3 = \frac{\pi \cdot (1,25 \cdot d)^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 100^2}{4} = 7850$  (м<sup>2</sup>).

4. Мощность ветроустановки при температуре окружающего воздуха 20 °С:

$$N_{B4} = \frac{c_p \cdot \rho_4 \cdot A \cdot v^3}{2} = \frac{0,45 \cdot 1,377 \cdot 5024 \cdot 5^3}{2} = 194570,1 \text{ (Вт)},$$

где площадь ометаемая ветроколесом  $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 80^2}{4} = 5024$  (м<sup>2</sup>).

Изменение мощности ветроустановки вследствие изменения температуры воздуха:

$$k_4 = \frac{N_{B4} - N_B}{N_B} \cdot 100\% = \frac{194570,1 - 167864,4}{167864,4} \cdot 100\% = 15\%$$

*Задача №2.* Дана ветроустановка диаметром 100 м, которая поддерживает при любой скорости ветра постоянный коэффициент быстроходности, равный 9.

1) При какой скорости ветра скорость концов лопастей ветроколеса достигнет скорости звука в вакууме 331 м/с?

2) При какой угловой скорости вращения скорость концов лопастей достигнет скорости звука в вакууме.

*Решение:*

1. Коэффициент  $z$  быстроходности есть отношение окружной скорости и конца лопастей к невозмущенной скорости  $v$  набегающего ветрового потока,  $z = \frac{u}{v}$ . Отсюда определяем скорость ветра, при которой скорость концов лопастей ветроколеса достигает скорости звука в вакууме 330 м/с:

$$v = \frac{u}{z} = \frac{330}{9} = 36,67 \text{ (м/с)}$$

2. Угловая скорость вращения концов лопастей определяется отношением:

$$\omega_{вет} = \frac{u}{R_{вет}} = \frac{330}{50} = 6,6 \text{ (рад}^{-1}\text{)}$$

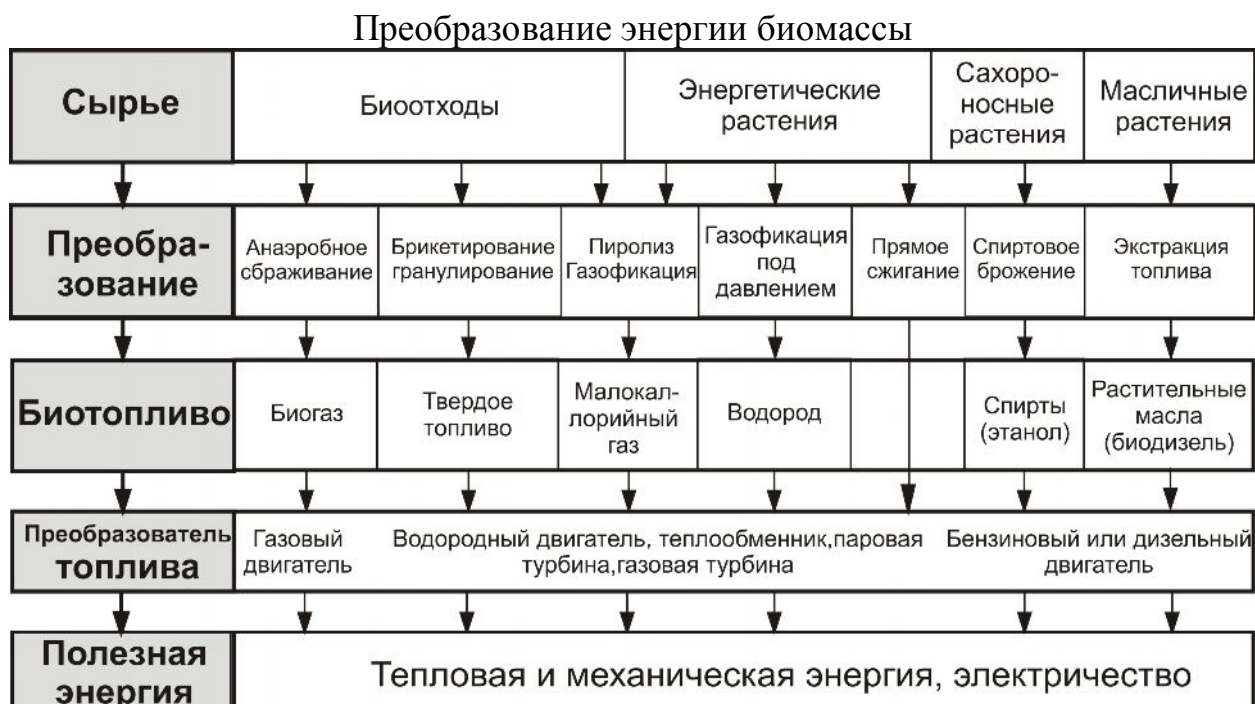
## ГЛАВА 8. ЭНЕРГИЯ ИЗ БИОМАССЫ

### 8.1 Преобразование энергии биомассы

*Биомассой* называют органические соединения, например живущие животные или растущие в природе растения, а также их останки. Основа биомассы – органические соединения углерода, которые в процессе соединения с кислородом при сгорании или в результате естественного метаболизма выделяют тепло. Посредством химических или биохимических процессов биомасса может быть трансформирована в такие виды топлива, как газообразный метан, жидкий метанол, твердый древесный уголь. Первоначальная энергия системы биомасса - кислород, возникает в процессе *фотосинтеза* под действием солнечного излучения, являющегося естественным вариантом преобразования солнечной энергии. Фотосинтез - это процесс образования органических веществ и аккумуляции химической энергии под действием солнечного излучения. В результате фотосинтеза образуются в основном углеводы, состоящие из углерода в окисленно-восстановительном состоянии (например, глюкоза  $C_6H_{12}O_6$ ).

Мировая выработка жидкого биотоплива (биодизеля и этанола) превысила 53 млрд. литров в 2007 году. Бразилия на протяжении последних лет была лидером по производству этанола, но в 2006 году их опередили США, выработав 18 млрд. литров. Почти половину мировой выработки биодизеля вырабатывается в Германии. Значительная выработка биодизеля осуществляется в Италии и США [REN08]. В КР практикуется преобразование биомасса для получения биогаза путем анаэробного сбраживания, а также прямое сжигание древесины и животноводческих отходов, например, кизяк.

Табл.8.1



В табл.8.1 приведены возможности использования биомассы с целью получения полезной энергии. Например, взяв в качестве сырья любые биоотходы, можно с помощью биохимической переработки - *анаэробное сбраживание*, получить газообразное биотопливо, называемое *биогазом*. Сжигая биогаз, можно получить тепловую энергию.

Всё биотопливо можно условно разделить на *твердые, жидкие и газообразные*.

## 8.2 Твердое биотопливо

Под твердым биотопливом понимаются, прежде всего, древесные продукты (*дрова, древесный пеллет*) и твердые биологические отходы (солома). Особенно в последнее время большую значимость приобретает древесный пеллет. Пеллеты (пилеты, пеллетс, древесные гранулы) - цилиндрической формы прессованные отходы древесного производства (опилки, стружки, кора и т.д.). На производство одной тонны пеллет уходит около 5 кубометров древесных отходов. Процесс производства пеллета можно условно разделить на следующие этапы: крупное дробление отходов древесины, сушка, мелкое дробление, водоподготовка,

*Крупное дробление.* Крупные дробилки измельчают сырье для дальнейшей просушки. Измельчение должно дойти до размеров частиц не более 25x25x2 мм. Крупное дробление позволяет быстро и качественно высушивать сырье и подготавливать его к дальнейшему дроблению в мелкой дробилке. Обычно влажные древесные отходы хранятся на бетонном полу, чтобы избежать смешивания с песком или камнями. Сырье подается в систему сушки с помощью скребкового устройства. Оператор может брать сырье с различных площадок и подавать необработанный продукт в систему сушки.

*Сушка.* Древесные отходы с влажностью более 15% очень плохо прессуются особенно прессами с круглыми матрицами. Кроме этого, изготовленные гранулы с повышенной влажностью не подходят для котлов. Поэтому сырье перед прессованием должно иметь влажность в промежутке 8 и 12%. Для качественного продукта влажность должна составлять 10% (+/- 1%). Сушилki бывают барабанного и ленточного типов. Выбор типа сушилki определяется видом сырья (щепа, опилки), требованиями к качеству продукции и источником получаемой тепловой энергии. В пеллетном производстве сушка является наиболее энергоемким процессом. Для сушки опилок расходуется приблизительно 1 МВт энергии на тонну выпариваемой влаги. Для практического расчета можно принимать, что на 1 т гранул требуется теплота сгорания от 1 плотного м<sup>3</sup> древесины. Оптимальным решением является сжигание коры в топке сушильной установки.

*Мелкое дробление.* В пресс сырье должно заходить с размерами частиц менее 4 мм. Поэтому дробилка измельчает сырье до необходимых размеров. Для качественного продукта насыпной вес после измельчения должен составлять 150 кг/м<sup>3</sup> (+/- 5%), а размер частиц не более 1,5 мм. Молотковые

мельницы используются для измельчения волокнистой стружки, опилок или щепы.

*Водоподготовка.* Сырье с влажностью менее 8% плохо поддается склеиванию во время прессования. Поэтому слишком сухое сырье также плохо. Для этого нужна установка дозирования воды в смесительной емкости. Лучший вариант - это шнековые смесители, в которых встроены входы для подачи воды или пара. Добавление горячего пара требуется, если прессуются твердые сорта древесины (дуб, бук), или сырье залежалое, некачественное. Для мягких сортов древесины хвойных пород достаточно добавления воды в смесителе.

*Прессование.* Прессование производится прессами различных конструкций, с плоской или цилиндрической матрицей. При этом диаметр матрицы может быть более метра, а мощность пресса до 500 кВт, в зависимости от заданной производительности. Также на производительность пресса в пределах 20% влияет размер получаемых гранул: обычно 6 мм для частного потребления и 10 мм для промышленности.

*Охлаждение.* Охлаждение обеспечивает получение качественного конечного продукта. Оно нужно для осушения гранул, нагретых после прессования до 70°...90 °С. Затем pellets можно просеивать и упаковывать.

*Расфасовка.* Обычно pellets хранятся в бункерах и транспортируются россыпью. Однако, для исключения потерь в качестве, рекомендуется производить расфасовку в биг-бэги - большие мешки. Наиболее качественные pellets для частного потребителя могут поставляться в 20-тикилограммовых мешках.

За рубежом pellets широко используются в качестве топлива для автоматизированных котельных, для бытового и промышленного использования. Размеры pellets обычно 6-8 мм в диаметре и 5-70 мм длиной, в зависимости от используемого сырья и качества производства pellets. Благодаря прессованной структуре, pellets удобны в транспортировке и хранении. Кроме того, зольный остаток составляет всего 0,5% от сгоревшего объема, который можно использовать в качестве удобрения. На рис. 8.1 изображены гранулы pellets, хранившиеся в емкости.

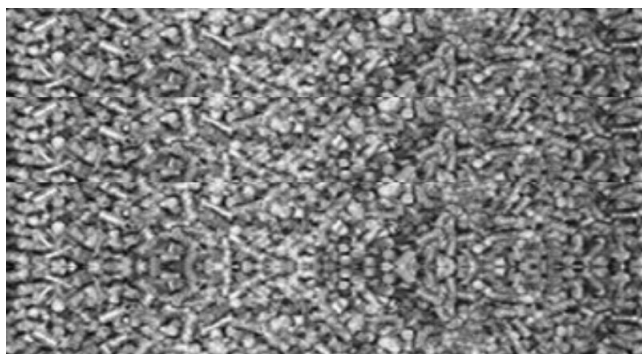


Рис.8.1 Гранулы pellets

Для сжигания пеллета разработаны специальные котлы. Пеллеты при горении не выделяют запах, и, как правило, за счет высокого КПД котельного оборудования дым от пеллета практически бесцветен. За счет низкого содержания в пеллетах серы уменьшаются выбросы в атмосферу двуокиси серы, а это, в свою очередь, ведет к уменьшению количества кислотных дождей. Пеллеты также выигрывают по всем позициям у каменного угля и жидкого топлива в области выброса других вредных веществ.

*Древесный уголь* также относится к твердому биотопливу. Традиционная технология получения древесного угля – это термохимическая обработка биомассы, называемая *пиролизом*. Пиролиз - это процесс нагрева или частичного сжигания для получения производных топлив или химических соединений. При получении древесного угля используется пиролиз без сбора паров и газов.

Важным параметром для оценки качества топлива является его *теплотворная способность*. Присутствие влаги в топливе из биомассы часто ведет к значительным потерям выхода тепловой энергии в связи с тем, что испарение воды требует 2,3 МДж/кг [Тва90]. Влагосодержание топлива из биомассы можно определить по формуле:

$$w = \frac{m_{\text{воды}}}{m_{\text{топлива}}} \cdot 100\%, \quad (8.1)$$

где  $m_{\text{воды}}$  - масса воды, содержащейся в биотопливе;  $m_{\text{топлива}}$  - масса биотоплива вместе с влагой.

В табл.8.2 приведены теплотворные способности биотоплива в сравнении с традиционным топливом.

Табл.8.2

Теплотворная способность традиционного топлива и биотоплива

	Влажность топлива $w$ , %	Теплотворная способность, МДж/кг
Древесина	50	7,9
Древесина (подсушенная)	30	12,2
Опилки	50	7,9
Древесный пеллет	8	17,6
Сено	18	13,7
Тритикале (пшенично-ржаной гибрид)	15	14,4
Древесный уголь		30
Бурый уголь	50	8
Каменный уголь	4	32

Как видно из таблицы 8.2, пеллет содержит наименьшее количество влаги, а соответственно максимальную теплотворную способность.



### 8.3 Жидкое биотопливо

Истощаемость естественного традиционного топлива и возрастающая потребность в жидком топливе для транспорта привели к получению нового биотоплива, которое по своим свойствам не сильно отличается от традиционного.

В качестве биотоплива широко распространены два совершенно разных типа продуктов:

- масла, получаемые из маслянистых растений;
- спирты, получаемые путем сбраживания биомассы.

*Биодизель* - это биотопливо на основе растительных или животных жиров (масел), а также продуктов их этерификации. Основным сырьем для производства биодизеля служат жирные, реже – эфирные масла различных растений и даже водорослей. К таким растениям можно отнести рапс (в Европе), соя (США), канола - разновидность рапса (Канада), пальмовое масло, ятрофа, касторовое масло (Бразилия).

Из 1 тонны сушеного рапса можно получить примерно 350 кг чистого рапсового масла. Если в данное масло добавить 11% метанола, получается сложный летучий эфир, известный как *биодизель*.

Для производства биодизеля сначала *рапс* (или др.) поступает в маслопресс, где масло отделяется от рапсового жмыха, используемого в комбикормовой промышленности. Далее рапсовое масло передается в *эстерификационную установку*. Для получения метилового эфира в растительное масло добавляются метанол и небольшое количество щелочного катализатора. Процесс эстерификации происходит в реакторе при температуре 45...50 °С в течение 80 мин. В результате химической реакции образуется метиловый эфир (биодизель), а также побочный продукт – глицерин, после чего происходит сепарация для отделения глицерина от биодизеля. Биодизель имеет сходные параметры с известным традиционным дизелем. В связи с этим некоторые страны разрешают продажу традиционного дизеля с небольшим процентом содержания биодизеля, тем самым стимулируя рынок и продвижение биодизеля.

В таблице 8.3 приведено сравнение дизельного топлива, рапсового масла и эфира расового масла.

В Германии имеется более 1000 заправок, позволяющих пополнить бак автомашины эфиром рапсового масла.

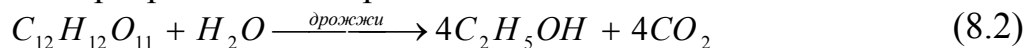
Табл.8.3

Сравнение основных параметров дизельного топлива и биотоплива

	Дизельное топливо	Рапсовое масло	Эфир рапсового масла
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	840	920	870
Цетановое число	<50	44	>49
Теплотворная способность (МДж/кг)	42,8	37	37,2

*Этанол и метанол.* Для производства спиртов (этанола или метанола) в качестве сырья используются сахароносные растения, а также пригодны содержащие целлюлозу древесина и солома. Рассмотрим процесс получения этанола из различного сырья:

1. Получение этанола из сахарного тростника. Из сока сахарного тростника получают промышленную сахарозу, а оставшуюся патоку используют для получения спирта. Сама патока содержит около 55% сахаров. Основная реакция превращения сахарозы в этанол имеет вид:



На практике выход ограничивается конкурирующими реакциями и потреблением сахарозы для производства дрожжей. Реакции ферментации для других сахаров (например, глюкозы) очень похожи.

2. Получение этанола из сахарной свеклы. Вначале получают сахар для сбраживания, но свекла не дает достаточного количества отходов для получения тепла. Из-за этого происходит удорожание этанола.

3. Получение этанола из растительного крахмала. Крахмал можно подвергнуть гидролизу на сахар. Это основной энергоаккумулирующий углевод растений. Состоит из двух компонентов с большой молекулярной массой: амилозы и амилопектина. Это крупные молекулы четко линейны и состоят из глюкозных остатков, соединенных углеродными связями, которые могут быть разрушены ферментами солода, содержащегося в некоторых культурах, например, в ячмене, или ферментами подходящих плесеней (грибков). Для таких методов необходима обработка сильными кислотами при давлении 0,2 МПа, но выход сахаров при этом снижается, а сам процесс по сравнению со сбраживанием удорожается.

4. Получение этанола из целлюлозы. Целлюлоза имеет полимерную структуру связей молекул глюкозы. Это полисахарид - один из самых распространенных природных полимеров, формирует прочный каркас древесных растений. Соответствующие связи молекул глюкозы в целлюлозе значительно труднее поддаются гидролизу, чем у крахмала. В растениях целлюлоза тесно связана с лигином (наличие этого сложного полимера и приводит к одревеснению, повышая прочность), препятствующим ее гидролизу до сахаров. Подобно крахмалу, возможен гидролиз целлюлозы в кислой среде, однако этот процесс дорог и требует подвода энергии. Гидролиз удешевляется и становится менее энергоемким при использовании грибков. Однако и в этом случае есть существенный недостаток – процесс идет слишком медленно. В основе промышленного процесса лежит использование измельченной древесной массы или старых газет. Механическое разрушение древесины – наиболее трудоемкая и дорогая стадия процесса, требующая много электроэнергии для питания приводов дробилок и валков.

В Бразилии и США имеется значительный опыт по массовому производству и потреблению транспортными средствами этанола. В табл.8.4 приведено сравнение основных параметров бензина и биотоплива

Сравнение основных параметров бензина и биотоплива

	Бензин	Этанол	Метанол
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	760	790	790
Октановое число	92	109	109
Теплотворная способность (МДж/кг)	43,5	26,7	20,0

## 8.4 Газообразное биотопливо

*Биогаз* – является основным видом газообразного биотоплива. *Биогаз* – это смесь, состоящая на 55-75% из метана и 25- 45% оксида углерода, не имеющая ни цвета при горении, ни запаха. Биогаз образуется при сбраживании биомассы анаэробным способом. Анаэробный способ сбраживания происходит при недостаточном поступлении кислорода или при его отсутствии. Необходимо соблюдать при этом условия (температура, уровень РН, влажность), которые необходимы для возникновения группы бактерий.

Техническая разработка для получения биогаза путем анаэробного сбраживания называется биогазовой установкой. В основу работы биогазовой установки заложены биологические процессы сбраживания и разложения органических веществ анаэробными бактериями, в результате чего получают биогаз. Питательные вещества, такие как растворимые соединения азота, сохраняются и далее используются в качестве удобрений почвенного гумуса. Получение биогаза становится экономически оправданным, когда биогазовая установка работает по переработке существующего потока органических отходов. В качестве отходов, а соответственно сырья, для биогазовой установки могут быть стоки канализационных систем, навоз свинофермы, бытовые органические отходы. Экономичность заключается в наличии сырья, которое технологически перерабатывается, извлекается биогаз.

### 8.4.1 Этапы анаэробного сбраживания

Анаэробное сбраживание (метановое сбраживание) представляет собой процесс разложения органических отходов до конечных продуктов, в основном метана и углекислого газа, в результате жизнедеятельности сложного комплекса микроорганизмов в анаэробных условиях под действием микрофлоры.

В процессе анаэробной ферментации участвуют многие виды микроорганизмов, однако основными биологическими агентами, способствующими разрушению органических веществ (субстрата) до  $\text{CH}_4$ , являются бактерии [Баа82]. Ферментация субстрата с образованием метана происходит в анаэробных системах, в которых при разложении органических отходов образуются акцептор электрона и  $\text{CO}_2$ . В среде, в которой легко

образуются или имеются другие акцепторы электрона (кислород, сера, сульфаты или нитраты), ферментации не происходит.

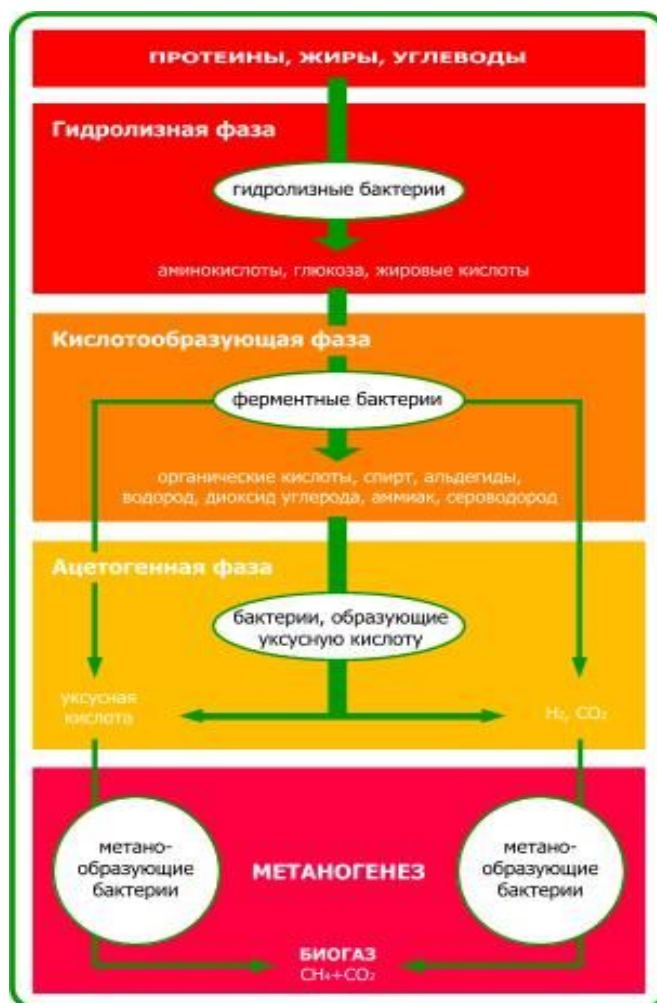


Рис. 8.2 Этапы процесса анаэробного брожения

На рис. 8.2 представлены поэтапные процессы сбраживания. На первом этапе анаэробного сбраживания происходит разложение высокомолекулярных соединений (углеводов, жиров, белковых веществ) на низкомолекулярные органические соединения.

На втором этапе при участии кислотообразующих бактерий происходит дальнейшее разложение с образованием органических кислот и их солей, а также спиртов, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>, а затем H<sub>2</sub>S и NH<sub>3</sub>. Окончательное бактериальное преобразование органических веществ в CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> осуществляется на третьем этапе процесса (метановое брожение). Кроме того, из CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> образуется в дальнейшем дополнительное количество CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>O.

Эти реакции протекают одновременно, причем метанообразующие бактерии предъявляют к условиям своего существования значительно более высокие требования, чем кислотообразующие. Так, например, они нуждаются в абсолютно анаэробной среде и требуют более длительного

времени для воспроизводства. Скорость и масштабы анаэробного брожения метанообразующих бактерий зависят от их метаболической активности.

В анаэробном разложении сложных органических веществ существенную роль играют метаногены, так как они являются единственными организмами, способными вызывать катаболизм уксусной кислоты и водорода с образованием газообразных продуктов в отсутствие солнечной энергии или акцепторов электрона. Без участия метаногенов эффективное расщепление сложных органических соединений практически становится невозможным из-за накопления негазообразных восстановленных жирных кислот и спиртов, которые содержат почти столько же энергии, сколько ее содержится в исходном субстрате.

Метаногены представляют собой уникальную группу бактерий, включающую различные виды с совершенно разной формой и структурой клеток [Баа82]. Для роста метаногенов необходимы строго анаэробные условия: микроорганизмы могут расти только в отсутствие кислорода при окислительно-восстановительном потенциале ниже 300 мВ. Требования к питательным веществам для этих микроорганизмов просты – рост большинства видов происходит в среде минеральных солей,  $\text{CO}_2$ , аммиака и сульфидов, которые соответственно являются основными источниками углерода, азота и серы.

#### 8.4.2 Условия для анаэробного сбраживания

Основные условия, которые необходимо выдерживать для выработки биогаза является поддержание *постоянной температуры* в метантенке (реакторе), *определенная кислотно-щелочная среда*, постоянное перемешивание и другие. Рассмотрим подробнее данные условия.

*Температура.* Метаболическая активность и репродуктивная способность микроорганизмов находятся в функциональной зависимости от температуры. Таким образом, температура влияет на объем газа, который можно получить из определенного количества органического вещества в течение заданного времени, а также на технологическое время процесса брожения, необходимое для высвобождения при соответствующей температуре определенного количества газа.

Согласно исследованиям с повышением температуры примерно до 54 °С, условия для образования газа улучшаются. Микробиологическая активность почти прекращается, если температура падает примерно до 15 °. К перепадам температуры, в особенности к ее внезапным понижениям, микроорганизмы весьма чувствительны и реагируют на это снижением метаболической активности и способности к воспроизведению.

Кроме того, температура влияет на качество газа. Так, при возрастании температуры было установлено снижение доли  $\text{CH}_4$  в общем объеме выделяющихся газов.

С учетом оптимизации процесса переработки органических отходов для получения биогаза и биоудобрений выделяют три температурных режима:

- *психофильный* режим определяется температурами до 20 – 25 °С,
- *мезофильный* режим определяется температурами от 25 °С до 40 °С и
- *термофильный* режим определяется температурами свыше 40 °С.

*Ингибиторы процесса.* К веществам, которые при высокой концентрации препятствуют жизнедеятельности микроорганизмов, относятся, прежде всего, тяжелые металлы и их соли, щелочные металлы, щелочноземельные металлы, аммиак, нитраты, сульфиды, детергенты, органические растворители, антибиотики.

Табл.8.5

Предельные концентрации веществ, препятствующих процессу метанового брожения

Компоненты	Замедляюще е действие, мг/л	Токсическое действие мг/л	Необходимая концентрация мг/л	Допустимая концентрация мг/л
Медь (Cu)	40-250	170-300	-	-
Кадмий (Cd)	150-600	20-600	-	0,12
Цинк (Zn)	150-600	250-600	-	32
Никель (Ni)	10-300	30-1000	0,006-0,5	4
Свинец (Pb)	300-340	340	0,02-200	12
Хром III (Cr)	120-300	260-500	0,005-50	8
Хром VI (Cr)	100-110	200-420	-	-
Кобальт (Co)	-	-	0,003-0,06	-
Молибден (Mb)	-	-	0,005-0,05	-
Селен (Se)	-	-	0,008	-
Марганец (Mn)	-	-	0,005-50	-
Ртуть (Hg)	-	-	-	0,08
Железо (Fe 2 <sup>+</sup> )	-	-	1-10	-
Натрий (Na)	-	-	-	8000
Магний (Mg)	-	-	-	3000
Аммиак (CH <sub>4</sub> )	-	-	-	1500
Сульфиды	-	-	-	200
Нитраты	-	-	-	50

В табл.8.5 для некоторых веществ приведены значения концентрации, которые ведут к существенному замедлению метанообразования. Дeterгенты, органические растворители и антибиотики даже в самых незначительных количествах препятствуют процессу брожения.

*Питательная среда.* Бактерии, для образования своих клеток требуют питательных веществ, витаминов, растворимых соединений азота, минеральных веществ и микроэлементов. Эти вещества в нужном количестве содержатся в жидком и твердом навозе. Достаточное их количество содержится также в сене, кукурузе (свежей или консервированной), остатках пищи, отходах кухни, внутренностях животных, барде и молочных продуктах - все эти продукты могут бродить в чистом виде без добавления других субстратов.

Предпосылкой беспрепятственного размножения бактерий служит наличие питательной среды, которая содержит как углевод и кислород для обеспечения этого процесса энергией, водород, азот, серу и фосфор – для образования белка, так и щелочные металлы, железо и микроэлементы.

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на метановое брожение, является соотношение углерода и азота в перерабатываемом сырье. Если соотношение C/N чрезмерно велико, то недостаток азота будет служить фактором, ограничивающим процесс метанового брожения. Если же это соотношение слишком мало, то образуется такое большое количество аммиака, что он становится токсичным для бактерий.

Микроорганизмы нуждаются как в азоте, так и в углероде для ассимиляции в их клеточную структуру. Различные эксперименты показали, что наиболее благоприятные условия соответствуют значениям C/N=10-20. Соотношение C/N показывает общее соотношение углеводов с общим содержанием азота.

Для достижения производства практикуется смешивание сырья для достижения оптимального соотношения C/N. В табл. 8.6 [Вед06] приведено соотношение содержания углерода и азота в различных органических отходах.

*Кислотно-щелочной баланс (pH).* Метанопродуцирующие бактерии лучше всего приспособлены для существования в нейтральных или слегка щелочных условиях. В процессе метанового брожения второй этап производства биогаза является фазой активного действия кислотных бактерий. В это время уровень pH снижается, то есть среда становится более кислой.

Однако, при нормальном ходе процесса жизнедеятельность разных групп бактерий в реакторе проходит одинаково эффективно и кислоты перерабатываются метановыми бактериями. Оптимальное значение pH в зависимости от сырья колеблется от 6,5 до 8,5.

*Концентрация твердых частиц.* Предпосылкой высокой интенсивности реакции служит беспрепятственный обмен веществ на граничных поверхностях фаз, который должен поддерживаться непрерывным обновлением этих поверхностей благодаря перемешиванию субстрата.

Однако это можно обеспечить только в том случае, если вязкость субстрата допускает свободу перемещения жидкости, взвешенных твердых частиц, в особенности, бактерий и пузырьков газа. Верхняя граница концентрации твердых частиц, при которой еще возможно свободное перемещение фаз, для субстрата с мелкодисперсной взвесью твердых веществ соответствует 10 ... 12%. При больших значениях выход газа значительно уменьшается. Путем интенсивного перемешивания и соответствующего подвода энергии нежелательный эффект можно существенно ограничить.

Табл. 8.6

Содержание азота и соотношение содержания углерода и азота для орг. отходов

Биоферментируемый материал	Азот N, %	Соотношение углерода и азота C/N
А. Навоз животных		
КРС	1,7-1,8	16,6-25
Куриный	3,7 – 6,3	7,3 – 9,65
Конский	2,3	25
Свиной	3,8	6,2-12,5
Овечий	3,8	33
Б. Отходы хозяйства		
Фекалии	6-7,1	6-10
Кухонные	1,9	28,60
Шкурки картофеля	1,5	25
Капуста	3,6	12,5
В. Растительные сухие отходы		
Кукурузные початки	1,2	56,6
Солома зерновых	1,0	49,9
Пшеничная солома	0,5	100-150
Кукурузная солома	0,8	50
Овсяная солома	1,1	50
Соя	1,3	33
Люцерна	2,8	16,6-17
Свекольный жом	0,3-0,4	140-150
Г. Другое		
Трава	4	12
Опилки	0,1	200-500
Опавшая листва	1,0	50

Твердые частицы, например, песок, глина и др. обуславливают образование осадка. Более легкие материалы поднимаются на поверхность сырья и образуют корку. Это приводит к уменьшению газообразования. Поэтому перед загрузкой в реактор рекомендуется тщательно измельчать растительные остатки - солому, объедки и др. и стремиться к отсутствию твердых веществ в сырье.



### 8.4.3 Влияние исходного материала на выход газа

Среди остатков и отходов сельскохозяйственного производства наиболее богаты необходимыми для метанового брожения питательными веществами экскременты животных. Однако, они очень различаются между собой как по наличию отдельных компонентов, так и по химическому составу в зависимости от того, о каком виде животных идет речь и какой корм эти животные потребляют (табл. 8.7). Кроме того, отходы животноводства в зависимости от способа содержания животных могут включать в себя самые различные количества воды, подстилочного материала и остатков корма.

Табл. 8.7

Состав экскрементов животных (в % к сухому веществу)

Компонент	Экскременты			
	Крупного рогатого скота (на откорме)	Дойных коров	Свиней	Кур
Органическая масса	77...85	77...85	77...84	76...77
Азот	2,3...4,0	1,9...6,5	4,0...10,3	2,3...5,7
Фосфор	0,4...1,1	0,2...0,7	1,9...2,5	1,0...2,7
Калий	1,0...2,0	2,4	1,4...3,1	1,0...2,9
Кальций	0,6...1,4	2,3...4,9		5,6...11,6
Магний	0,5...0,6			0,9...1,1
C/N	9...15	9...15	9...15	9...15
Сырая клетчатка (целлюлоза)		27,6...50,3	19,5...21,4	13,0...17,8
Сырой жир		2,9...4,3	3,5...4,0	2,4...5,0
Сырой протеин		9,3...20,7	16,4...21,5	20,5...42,1
Лигнин	16...30	16...30		9,6...14,3

Если подвергаемый сбраживанию исходный субстрат содержит, кроме стойлового навоза, другие растительные остатки, следует обращать особое внимание на их состав. При этом прежде всего нужно учитывать характерное для определенных условий высокое содержание лигнина, который практически не разлагается микробами и, следовательно, не принимает участия в процессе газообразования. По этой причине выход газа из экскрементов жвачных животных, которые нуждаются в кормах с высоким содержанием сырой клетчатки, значительно меньше, чем из экскрементов кур и свиней.

*Размеры твердых частиц.* Активного обмена веществ и высокой скорости биохимических обменных процессов можно достигнуть, если поддерживать и непрерывно обновлять максимально возможную величину граничных поверхностей между твердой и жидкой фазами. Поэтому твердые материалы, в особенности растительного происхождения, должны быть

предварительно подготовлены с помощью специальных устройств, чтобы в результате эффективного механического воздействия на куски стеблей и соломы получить частицы возможно меньшего размера. Доля взвешенных в жидкости твердых частиц в значительной мере зависит от технических средств, которые используются для получения тщательного перемешивания, гидравлического транспортирования субстрата и отделения газа. Современный уровень развития техники позволяет перерабатывать в сельскохозяйственных биогазовых установках субстраты с содержанием твердых веществ до 12%, если длина частиц отдельных волокнистых и стеблевидных твердых компонентов не превышает 30мм.

В принципе органические вещества можно сбраживать и в твердой фазе, если иметь достаточно влажную среду. Однако, сбраживание твердых веществ практически не получило промышленного значения, поскольку в твердой фазе нельзя обеспечить перераспределение и взаимное перемешивание бактерий и субстрата, а также удовлетворительный отвод газа.

*Максимальный выход газа.* Если отнести выход газа, возможный при температуре процесса около 32 °С, к количеству разложившейся органической массы, то соответствующие значения будут лежать в пределах  $V_{\text{общ}} = 0,8 \dots 1,0 \text{ м}^3$  на 1 кг разложившейся органической массы.

Напротив, выход газа, отнесенный к единице закладываемой в реактор органической массы, будет находиться в интервале  $V_{\text{общ}} = 0,4 \dots 1,0 \text{ м}^3$  на 1 кг внесенной в реактор органической массы. Таким образом, в зависимости от доли способной к сбраживанию органической массы в реакторе разлагается лишь 40...50 % всей закладываемой в него органической массы.

Соотношение количеств газа, которые могут быть выделены из органического вещества жидкого навоза дойных коров (Д), бычков на откорме (Б), свиней (С) и кур (К) в процессе брожения при температуре 33 °С, в первом приближении можно принять равным  $Д : Б : С : К = 5 : 7 : 8 : 10$

Для выделения определенного количества газа из различных органических материалов требуется специфическая для каждого из них продолжительность процесса брожения, причем выход газа в единицу времени сначала резко увеличивается, а затем по достижении максимума постепенно уменьшается. Трава, содержащая много белковых веществ, обладает высокой скоростью реакции и дает большой выход газа, в то время как солома и экскременты откармливаемых бычков из-за значительной доли лигнина сбраживаются гораздо медленнее и выделяют меньше газа. Это также хорошо видно из таблицы 7, в которой приводятся данные о возможных значениях выхода газа и о продолжительности процесса, необходимого для полного сбраживания типичных сельскохозяйственных материалов.

#### **8.4.4 Состав биогаза**

Как уже было сказано выше, к основным компонентам биогаза относятся  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , соотношение которых зависит от исходного субстрата и

характеристик процесса брожения (температуры, времени пребывания массы в реакторе, загрузки рабочего пространства и др.). Наряду с этим важнейшими компонентами биогаз содержит незначительные количества  $H_2$  и  $H_2S$  (табл. 8.8), а также  $N_2$ .

Приведенные в таблице 6 физические свойства биогаза позволяют судить о возможностях его практического использования и необходимых для этого приемах. Объемная теплота сгорания ( $Q_B$ ) определяется в основном содержанием  $CH_4$ , поскольку незначительные количества  $H_2$  и  $H_2S$  на этот показатель практически не влияют. Соответственно температура воспламенения и предел воспламеняемости тоже зависят от содержания  $CH_4$ . При выяснении возможности сжижения газовой смеси необходимо учитывать критические значения давления и температуры отдельных ее компонентов (см. табл. 6). Эти значения показывают, что сжижение биогаза практически нецелесообразно. При использовании биогаза следует учитывать разность в плотности отдельных его компонентов. В проходных неветилируемых помещениях это может привести к опасному для жизни людей накоплению  $CO_2$  и  $H_2S$  в нижних слоях воздуха. Кроме того, скопление  $CH_4$  связано с опасностью взрыва.

Табл. 8.8

Состав и характеристики биогаза

Характеристика	Компоненты биогаза				Биогазовая смесь (60% $CH_4$ + 40% $CO_2$ )
	$CH_4$	$CO_2$	$H_2$	$H_2S$	
Объемная доля, %	55-70	27-44	<1	<3	100
Объемная теплота сгорания, МДЖ/м <sup>3</sup>	35,8	-	10,8	22,8	21,5
Предел воспламеняемости (содержание в воздухе), %	5-15	-	4-80	4-45	6-12
Температура воспламенения, °С	65-750	-	585	-	650-750
Критическое давление, МПа	4,7	7,5	1,3	8,9	7,5-8,9
Критическая температура, °С	-82,5	31,0	-	100,1	-2,5
Нормальная плотность, г/л	0,72	1,93	0,09	1,54	1,2
Критическая плотность, г/л	102	468	31	349	320
Плотность относительно воздуха	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83

Выход газа обычно подсчитывается в литрах или кубических метрах на килограмм сухого вещества, содержащегося в навозе. В табл.8.9 [Вед06] показаны значения выхода биогаза на килограмм сухого вещества для разных видов сырья после 10-20 дней ферментации при мезофильной температуре.

Табл.8.9

## Выход биогаза и содержание метана для разного типа сырья

Тип сырья	Выход газа, (м <sup>3</sup> на 1 килограмм сухого вещества)	Содержание метана, %
<b>Навоз животных</b>		
Навоз КРС	0,250-0,340	65
Птичий помет	0,310-0,620	60
Конский навоз	0,200-0,300	56-60
Свиной навоз	0,340-0,580	65-70
Овечий навоз	0,300-0,620	70
<b>Отходы хозяйства</b>		
Сточные воды, фекалии	0,310-0,740	70
Овощные отходы	0,330-0,500	50-70
Картофельная ботва	0,280-0,490	60-75
Свекольная ботва	0,400-0,500	85
<b>Растительные сухие отходы</b>		
Пшеничная солома	0,200-0,300	50-60
Солома ржи	0,200-0,300	59
Ячменная солома	0,250-0,300	59
Кукурузная солома	0,380-0,460	59
Овсяная солома	0,290-0,310	59
Лен	0,360	59
Конопля	0,360	59
Свекольный жом	0,300	
Листья подсолнечника	0,300	59
Клевер	0,430-0,490	
<b>Другое</b>		
Трава	0,280-0,630	70
Листва деревьев	0,210-0,290	58

**8.4.5 Шлам – лучшее удобрение**

Шламом называется остаток, образующийся в процессе получения анаэробного сбраживания. Шлам содержит значительное количество питательных веществ и может быть эффективно использован в качестве удобрения. Состав остатка, полученного при анаэробной переработке органических отходов, зависит от химического состава сырья, загружаемого в реактор. Во время брожения разлагается в среднем 30 % органического вещества, что составляет 1-2% массы жидкого навоза.

Во время процесса брожения аммиака шлам выделяется из органических азотистых соединений и вместе с соединениями фосфора и калия, имеющимися в субстрате и образующимися в результате разложения, преобразует перебродившую массу в богатое питательными веществами органическое удобрение. Кроме того, в зависимости от степени сбраживания уменьшается содержание углевода по сравнению с его содержанием в исходном субстрате. Обусловленное этим уменьшение соотношения C/N оказывается благоприятным при использовании шлама в качестве удобрения. Питательные свойства шлама (биоудобрения) определяются количеством органических веществ и химических элементов, которые оно содержит. Все питательные для растений вещества, такие как азот, фосфор, калий и магний, а также микроэлементы и витамины, необходимые для роста растений, сохраняются в биоудобрении. Соотношение углерода и азота (около 1:15) благоприятно влияет на качество почв. В табл. 8.10 приводится примерное содержание питательных веществ в биоудобрении.

Табл. 8.10

Содержание элементов в биоудобрении (в граммах на 1 кг сухого вещества)

Сырье	Фосфат P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Калий K <sub>2</sub> O	Кальций CaO	Магний MgO	Азот N <sub>2</sub>
Навоз	3,05	5,64	3,25	0,98	1,75
Навоз и растительные отходы	6,37	7,98	5,15	1,95	3,37
Растительные отходы	6,66	8,88	5,18	2,22	3,70

Содержание фосфата (форма фосфора, напрямую усваиваемая растениями) не изменяется в процессе ферментации сырья. В этой форме растениями может быть усвоено около 50% общего содержания фосфора. Ферментация не влияет на содержание калия, от 75 до 100% которого может быть усвоено растениями.

В отличие от фосфата и калия, некоторое количество азота изменяется в процессе ферментации. Около 75% азота, содержащегося в свежем навозе, становится частью органических макромолекул, остальные 25% представлены в минеральной форме. После переработки в биогазовой установке около 50 % азота в биоудобрении находятся в органической форме, и 50% - в минеральной. Минеральный азот может быть напрямую усвоен растениями, а органический азот должен сначала минерализоваться с помощью почвенных микроорганизмов.

Поскольку степень сбраживания, т.е. разложения органического вещества, достигает 30...40%, и благодаря этому в основном происходит распад биологически нестабильных органических соединений, шлам лишен запаха, свойственного исходному субстрату.

Гигиенический эффект анаэробного брожения обуславливается прежде всего тепловым воздействием в течение определенного отрезка времени. Для

уничтожения отдельных возбудителей болезней требуются в каждом конкретном случае определенная минимальная температура и минимальная продолжительность их пребывания при этой температуре. Чтобы гарантировать полное уничтожение вегетативных форм бактериальных возбудителей инфекционных заболеваний, в установках дискретного действия при температуре брожения около 30 °С, необходимо более 30 сут. Более эффективное действие в течение меньшего срока пребывания массы в реакторе (12...20 сут) достигается только при температуре брожения выше 50 °С. Однако, абсолютно надежного обеззараживания ожидать не следует, так как всегда существует риск, что незначительное число микробов сохранит свою жизнеспособность и сможет послужить источником инфекции. О поведении вирусов, подвергаемых упомянутому воздействию, пока еще не имеется каких-либо данных.

#### **8.4.6 Компоненты биогазовой установки**

##### *Реактор (метантенк)*

Основное оборудование биогазовой установки - герметически закрытая емкость с теплообменником (реактор или метантенк), устройства для ввода и вывода навоза и для отвода газа.

Главный критерий при выборе конструкции реактора - это возможность реализовать ее на практике и удобство с точки зрения обслуживания и эксплуатации. Вне зависимости от выбора конструкции, реактор должен отвечать следующим требованиям:

- абсолютная герметичность стенок, препятствующая газообмену и непроницаемость для жидкостей;
- сохранение прочности в статическом состоянии при воздействии собственной силы тяжести и массы загружаемого субстрата;
- совершенная теплоизоляция;
- коррозионная стойкость;
- надежность загрузки и выгрузки субстрата;
- доступность внутреннего пространства для обслуживания.

Водонепроницаемость нужна для предотвращения утечек и ухудшения качества грунтовых вод, газонепроницаемость - для сохранения полного объема вырабатываемого биогаза и для предотвращения смешивания воздуха с газом в реакторе.

Теплоизоляция - необходимое условие для эффективной работы биогазовой установки в климатических условиях Кыргызской Республики.

Минимальная площадь поверхности снижает стоимость строительства и потери тепла через стенки реактора.

Стабильность конструкции реактора необходима для выдерживания всех нагрузок (давление газа, вес и давление сырья, вес покрытий) и обеспечивает долговременную работу установки.

##### *Формы реактора*

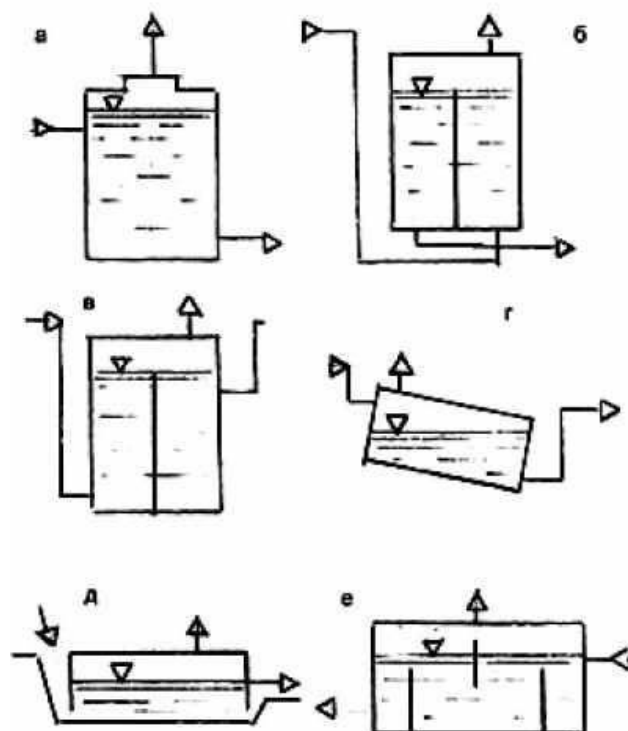


Рис. 8.3. Различные конструкции реактора и систем загрузки и выгрузки

С точки зрения динамики жидкостей, оптимальна яйцеобразная форма реактора, но ее сооружение требует больших затрат. Второй наилучшей формой является цилиндр с коническим или полукруглым дном и верхом. Квадратные реакторы из бетона или кирпича не рекомендуются к использованию, так как в углах образуются трещины из-за давления сырья, а также собираются твердые частицы, что нарушает процесс сбраживания.

Реактор может разделяться с помощью внутренних перегородок на несколько секций для предотвращения появления корки на поверхности сырья и для обеспечения более полного сбраживания сырья. На рис.8.3 [Вем06] изображены: а – цилиндрический реактор с верхней загрузкой; б – цилиндрический реактор с нижней загрузкой; в – цилиндрический двухсекционный реактор; г – наклонный реактор; д – траншейный реактор с плавающим покрытием; е – горизонтальный секционный реактор.

Реакторы сооружаются из различных материалов.

Стальные емкости обладают преимуществом герметичности, могут выдерживать, большое давление и сравнительно легки в изготовлении. Большой проблемой, однако, является чувствительность к ржавчине, которую необходимо предотвращать подходящими покрытиями. Экономически такие емкости выгодны только в случае использования уже готовых емкостей. При наличии металлической цистерны достаточно проверить внутреннюю и внешнюю поверхности стенок на предмет наличия раковин, качества сварки, наличия отверстий и других повреждений, которые должны быть устранены. Затем эти поверхности должны быть очищены и окрашены.

Пластиковые емкости, используемые в качестве реакторов, бывают мягкие и твердые. Мягкие емкости легко повредить и сложно утеплить для круглогодичной работы. Твердые пластиковые емкости отличаются стабильностью конструкции и не подвержены коррозии, поэтому рекомендуются к использованию для психофильной переработки органических отходов.

Бетонные емкости приобрели большую популярность в развивающихся странах в последние годы. Необходимая газонепроницаемость требует осторожного строительства и специальных покрытий, часты трещины в углах реактора, но большими плюсами являются недорогое строительство и практически неограниченный срок эксплуатации.

При строительстве биогазовой установки с бетонным, кирпичным или каменным реактором, необходимо обеспечить газо- и водонепроницаемость реактора. Необходимо покрыть реактор изнутри слоем вещества, способного выдержать температуры до 60 °С и устойчивого к воздействию органических кислот и сероводорода.

Месторасположение установки зависит от нескольких факторов - наличия свободных площадей, отдаленности от жилых помещений, места складирования отходов, расположения мест содержания животных и т.д. В зависимости от глубины залегания грунтовых вод, удобства загрузки и выгрузки сырья реактор может иметь наземное, частично или полностью заглубленное положение.

*Система подготовки сырья.* Система подготовки сырья служит для разведения исходной органической массы водой для обеспечения необходимой влажности и температуры сырья, а также для закачки сырья в реактор. Инженерные задачи, решаемые при разработке такого узла - это равномерное перемешивание исходной смеси, поддержание температуры смеси в заданных пределах, независимо от температуры окружающей среды, закачка в реактор строго определенной порции сырья с сохранением герметичности реактора и постоянства давления газа на выходе.

Во многих биогазовых установках для решения этих задач используется закачка смеси из системы подготовки под действием силы тяжести или с помощью специального фекального насоса.

Первый способ - самый простой и дешевый, но он усложняется с увеличением объема реактора. Суть его сводится к тому, что емкость для подготовки сырья располагается выше реактора на рассчитанную величину, и подготовленное сырье заливается в реактор самотеком. Особенно удобно применять этот метод, когда рельеф местности, где расположена биогазовая установка, способствует этому, и не надо строить слишком высокую эстакаду. Объем емкости для подготовки сырья обычно равен 5-10% объема реактора. С увеличением объема растет нагрузка на конструкцию эстакады, что требует ее усложнения и удорожания.

Второй способ - классический. Сложности заключаются в том, что дешевые фекальные насосы не имеют режущих ножей и поэтому легко могут засориться. А очистка насоса и подающего тракта от фекальных масс



вручную - процедура не из самых приятных. Стоимость хорошего фекального насоса сопоставима со стоимостью самой малой биогазовой установки. Поэтому применение фекального насоса имеет смысл для биогазовых установок средних размеров.

*Система подогрева реактора.* Температура сырья в реакторе должна поддерживаться на уровне, оптимальном для функционирования соответствующих анаэробных бактерий. Сама реакция - экзотермическая, но при температуре окружающей среды, существенно ниже требуемой температуры реакции, сырье необходимо подогревать. Сложность заключается в том, что подогрев должен быть равномерным, и температура должна удерживаться в заданных пределах. Рациональнее всего использовать для подогрева реактора энергию сжигания биогаза, вырабатываемого установкой.

В крупных установках биогаз обычно перерабатывается в электричество в когенерационных установках (генератор на основе двигателя внутреннего сгорания). Система охлаждения двигателя отводит тепло в специальную емкость. А дальше через теплообменники в этой емкости тепло подается для подогрева реактора, а также для внутренних нужд владельца биогазовой установки. В данном случае тепло является просто побочным продуктом когенерационной установки, вырабатывающей электричество.

Малые и средние биогазовые установки не вырабатывают так много газа, чтобы загрузить стандартную когенерационную установку. Поэтому для их обогрева применяют стандартные газовые котлы, такие же, как и для обогрева помещений. Только трубы с горячей водой пропускают сквозь реактор. Эта конструкция не слишком сложная, но все же не имеет экономического смысла для малых биогазовых установок.

Для каждой биогазовой установки необходимо обеспечить начальный разогрев для того, чтобы началась реакция и стал вырабатываться биогаз. Если запускать установку в теплое время года, то при температуре окружающего воздуха свыше 20 °С примерно через неделю реакция начнется, масса в реакторе начнет сама разогреваться, начнет выделяться биогаз. В холодное время года такой запуск невозможен. Поэтому для запуска необходим либо внешний источник газа, либо система электроподогрева. И если газ в большинстве случаев будет недоступен, то использовать электричество почти всегда возможно. А для малых установок система электроподогрева представляется единственно рациональной. Она не слишком дорогая, легко управляется и при хорошей термоизоляции реактора не будет слишком дорогой в эксплуатации.

*Система перемешивания массы в реакторе.* Сырье в реакторе в процессе протекания реакции имеет тенденцию разделяться на фракции. На дне реактора скапливается нерастворимый осадок, более легкие частички, увлекаемые пузырьками газа, поднимаются наверх и образуют корку. Все это существенно замедляет скорость реакции.

Для того чтобы реакция протекала равномерно и эффективно, массу внутри реактора необходимо время от времени перемешивать. Также перемешивание улучшает равномерность прогрева сырья.

Детали перемешивающего устройства должны быть сделаны из коррозионно-стойкого материала. Привод перемешивающего устройства должен находиться либо внутри реактора, либо необходимо применить высококачественную переходную муфту. Можно также применить гидравлическое либо пневматическое перемешивание. Из всех четырех способов самым дешевым и надежным для малых установок получается применение перемешивающего устройства, находящегося внутри реактора. Специальные переходные муфты не являются стандартным изделием, поэтому применение их в малых и средних биогазовых установках целесообразно при их серийном выпуске. Для пневматического перемешивания нужен качественный пожаро- и взрывобезопасный компрессор. Для гидравлического перемешивания нужен качественный мощный фекальный насос, который достаточно дорого стоит. Поэтому два последних способа целесообразней применять в крупных установках.

*Система термоизоляции реактора.* Реактор, как указано выше, представляет собой термос. Чем качественнее будет сделана термоизоляция, тем выше будет КПД реактора, тем меньше энергии будет расходоваться на поддержание необходимой температуры. Особенно важна термоизоляция при эксплуатации биогазовой установки в зимних условиях.

Идеальный термос имеет полые стенки, внутри которых вакуум. Реально это изготовить невозможно, но основной принцип термоизоляции состоит именно в этом: помимо внутренней силовой стенки реактора делается внешняя герметичная стенка с отражающим слоем, направленным внутрь. Между стенками - пустота, либо пористый наполнитель.

*Газгольдер.* Газгольдер - это емкость, в которой накапливается выработанный биогаз. Также газгольдер в биогазовой установке выполняет функцию стабилизатора давления газа и буфера при заправке реактора и сливе удобрений.

В больших биогазовых установках газгольдером служит сам реактор, который закрывается сверху специальной резиновой мембраной. Рабочий объем такого газгольдера не очень большой, но у крупных биогазовых установок нет неравномерностей в потреблении газа, поскольку весь газ сразу перерабатывается в электричество.

В малых и средних биогазовых установках потребление биогаза непредсказуемо, поэтому желательно, чтобы рабочий объем газгольдера соответствовал хотя бы одно- или двухчасовой выработке биогаза установкой. Также желательно, чтобы рабочий объем газгольдера более чем в два раза превышал объем единоразовой заправки или слива сырья. Для малых и средних биогазовых установок обычно применяют мокрые и сухие газгольдеры. Мокрый газгольдер имеет заметно большую стоимость и сложность в эксплуатации, чем сухой, изготовленный из современных синтетических материалов.

*Газовая система.* Биогаз, выработанный биогазовой установкой, не подается напрямую потребителю, а проходит через несколько специальных устройств, которые можно назвать газовой системой биогазовой установки.

Прежде всего, биогаз необходимо пропустить через обратный клапан, который обеспечивает движение газа только в одном направлении - от реактора к потребителю. Самый простой обратный клапан - жидкостный, похожий на тот, который мы применяем, сбрасывая домашнее вино. Этот обратный клапан может быть общим для нескольких реакторов, обеспечивая одновременно независимость их газовых систем и в то же время равенство давлений в рабочих режимах.

Для контроля над давлением газа устанавливается манометр. Также обязательным и важнейшим элементом является предохранительный клапан, который стравливает в атмосферу биогаз при превышении допустимого давления. Такой предохранительный клапан тоже проще и дешевле всего сделать жидкостным, как и обратный клапан. Только жидкость в него необходимо заливать незамерзающую и неиспаряющуюся, типа "Тосол", поскольку она напрямую сообщается с атмосферой.

Вообще говоря, метан - основная составная часть биогаза - более всего разрушает озоновый слой Земли, и поэтому выбросы метана в атмосферу с точки зрения экологии очень нежелательны. Поэтому биогаз, прошедший через предохранительный клапан, обычно сжигают в факельной установке. Факельная установка - это горелка, на которую подается искра для розжига в момент срабатывания предохранительного клапана, и огонь поддерживается, пока предохранительный клапан открыт. То есть механизм действия точно такой же, как и в современных газовых котлах.

*Система слива переработанного сырья.* В больших биогазовых установках шлам или отработанное сырье сливают при помощи шнековых насосов.

Для малых и средних биогазовых установок, выгоднее всего сливать шлам под действием силы тяжести в емкость, расположенную ниже реакторов. При этом система слива представляет собой обычную канализационную трубу с соответствующим краном. Главная технологическая особенность - это окончание трубы, которое должно обеспечить невозможность засасывания в реактор воздуха при сливе.

#### **8.4.7 Технологические схемы биогазовых установок**

Технологические схемы и конструктивно-технологические параметры биогазовых установок зависят от объемов переработки и свойств сбрасываемого материала, тепловлажностного режима, способов загрузки и перебраживания субстрата и ряда других факторов.

Существует много различных конструкций биогазовых установок. Их классифицируют по методам загрузки сырья, методам сбора биогаза, по используемым для их сооружения материалам, горизонтальному или

вертикальному расположению реактора, подземной или наземной конструкции, а также по использованию дополнительных устройств.

По методу загрузки сырья выделяют установки *порционной и непрерывной загрузки*, которые отличаются временем сбраживания и регулярностью загрузки сырья. Наиболее эффективными с точки зрения выработки биогаза и получения биоудобрений являются установки непрерывной загрузки.

Установки непрерывной загрузки ежедневно загружаются маленькими порциями сырья. При загрузке нового сырья, равная порция переработанного шлама выгружается. Сырье, перерабатываемое в таких установках, должно быть жидким и однородным. Производство газа стабильно и количественно превышает объем вырабатываемого на порционных установках биогаза.

Объем субстрата рассчитывается в соответствии с заданными гидравлическими расчетами пребывания массы в реакторе. Если обеспечивается постоянство условий производства, а именно подачи массы, концентрации сухого вещества и загрузки рабочего пространства, т.е. концентрация способного к брожению и равномерное перемешивание массы, то этот вид производства позволяет получить максимальный выход газа при непрерывном процессе газообразования. Практически все строящиеся сейчас в развитых странах установки работают как установки непрерывной загрузки.

Реакторы периодического действия характеризуются прерывистым процессом, протекающим не менее чем в двух одинаковых по размерам и форме реакторах. В случае ежесуточной загрузки свежего субстрата реакторы при образовании определенного количества шлама (так называемого затравочного шлама) попеременно заполняются свежим субстратом и по истечении заданного срока брожения опорожняются так, что в них остается только затравочный шлам. Поскольку при постоянном количестве подаваемого в реактор материала загрузка рабочего пространства во время процесса заполнения будет постоянно снижаться по сравнению с оптимальным значением, соответствующим исходному количеству шлама, потенциальная производительность этой системы будет использоваться не полностью. Кроме того, если учитывать наличие порожнего объема реактора во время процесса заполнения, то эта система требует большего рабочего объема, чем проточная.

Еще одна особенность рассматриваемой системы заключается в том, что ее нельзя использовать без газового аккумулятора (газгольдера) с постоянным запасом газа, достаточным для заполнения освобождающегося при выгрузке шлама объема реактора. Это для предотвращения попадания воздуха в рабочее пространство реактора.

*Методы сбора биогаза.* Внешний вид биогазовых установок зависит от выбранного метода сбора биогаза.

Баллонные установки представляют собой термостойкий пластиковый или резиновый мешок (баллон), в котором совмещены реактор и газгольдер. Трубы для загрузки и выгрузки сырья крепятся прямо к пластику реактора.

Давление газа достигается за счет растяжимости мешка и за счет дополнительного груза, который ложится на мешок. Преимущества такой установки – низкая стоимость, легкость перемещения, простота конструкции, высокая для психофильного режима температура брожения, простота очистки реактора, загрузки и выгрузки сырья. Недостатки такой установки – короткий период эксплуатации (2-5 лет), высокая восприимчивость к внешним воздействиям, малая возможность создания дополнительных рабочих мест.

Установки с фиксированным куполом (рис. 8.4) [Віо96] состоят из закрытого, куполообразного реактора и выгрузочной емкости, также известной как компенсирующая емкость. Газ собирается в верхней части реактора – куполе. Когда загружается очередная порция сырья, переработанное сырье выталкивается в компенсирующую емкость. С увеличением давления газа повышается уровень переработанного сырья в компенсирующей емкости.

Реакторы установок с фиксированным куполом обычно представляют собой кирпичные или бетонные емкости. Такие установки покрываются землей до вершины, наполненной газом, для сдерживания внутреннего давления (до  $0,15 \text{ кг/см}^2$ ). По экономическим причинам минимальный рекомендуемый размер реактора —  $5 \text{ м}^3$ . Известны такие установки с объемами реакторов до  $200 \text{ м}^3$ .

Газгольдером является верхняя часть установки с фиксированным куполом (место, где собирается газ), которая должна быть герметичной. Кирпичная кладка и бетон негерметичны, поэтому эта часть установки должна покрываться слоем вещества, не пропускающего газ (латекс, синтетические краски). Возможностью уменьшить риск трещин в газгольдере является строительство слабого кольца в кладке реактора. Такое кольцо является эластичным соединением между нижней (водонепроницаемой) и верхней (газонепроницаемой) частью полусферической структуры установки. Оно предотвращает продвижение трещин, появляющихся из-за гидростатического давления в нижних частях реактора, в верхнюю часть газгольдера.

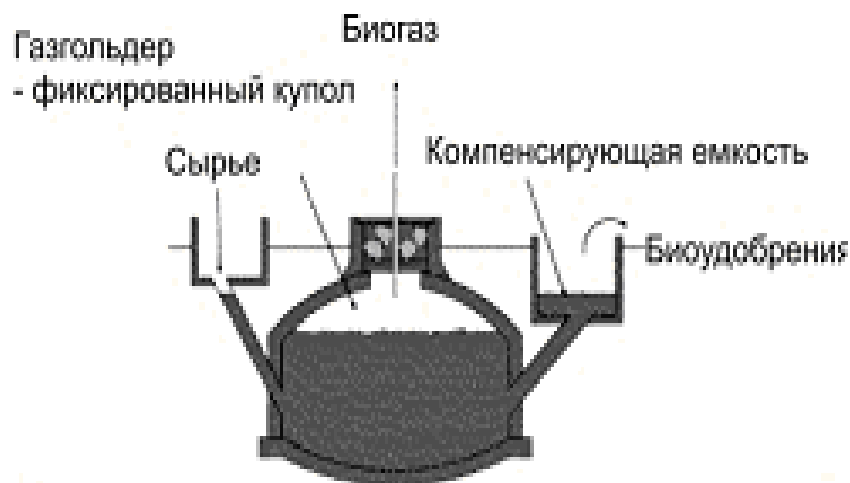


Рис.8.4. Установка с фиксированным куполом

Установки с плавающим куполом (рис. 8.5 и 8.6) состоят обычно из подземного реактора и подвижного газгольдера. Газгольдер плавает или прямо в сырье, или в специальном водяном кармане. Газ накапливается в газгольдере, который поднимается или опускается в зависимости от давления газа. Газгольдер поддерживается специальной рамкой от опрокидывания. Если газгольдер плавает в специальном водном кармане, он предохранен от опрокидывания. На рис.8.5 установка с плавающим пирамидальным колоколом, где 1 – яма ферментатора с сырьем, 2 – колокол, 3 – выпускной патрубков, 4 – трубопровод подачи биогаза, 5 – канавка гидрозатвора с водой, 6 – подогрев емкости, 7 – трубопровод. Рис.8.6 - установка с коническим колоколом, где 1 – яма ферментатора с сырьем, 2 – колокол, 3 – выпускной патрубков, 4 – трубопровод подачи биогаза, 5 – канавка гидрозатвора с водой. Преимуществами данных конструкций являются легкость ежедневных операций, легкость определения объема газа по высоте, на которую поднялся газгольдер. Давление газа является постоянным и определяется весом газгольдера. Строительство установки с плавающим куполом нетрудное, и ошибки в конструкции обычно не ведут к большим проблемам в получении газа. Недостатками такой конструкции являются высокая стоимость стального реактора и высокая чувствительность железа к коррозии. Поэтому, установки с плавающим куполом имеют меньший срок службы, чем установки с фиксированным верхом.

Выбор расположения реактора установки зависит от метода загрузки и наличия свободной территории в хозяйстве. Горизонтальные установки выбирают для непрерывного метода загрузки сырья и при наличии достаточного места. Вертикальные установки больше подходят для порционной загрузки сырья и используются при необходимости для уменьшения места, занимаемого реактором.

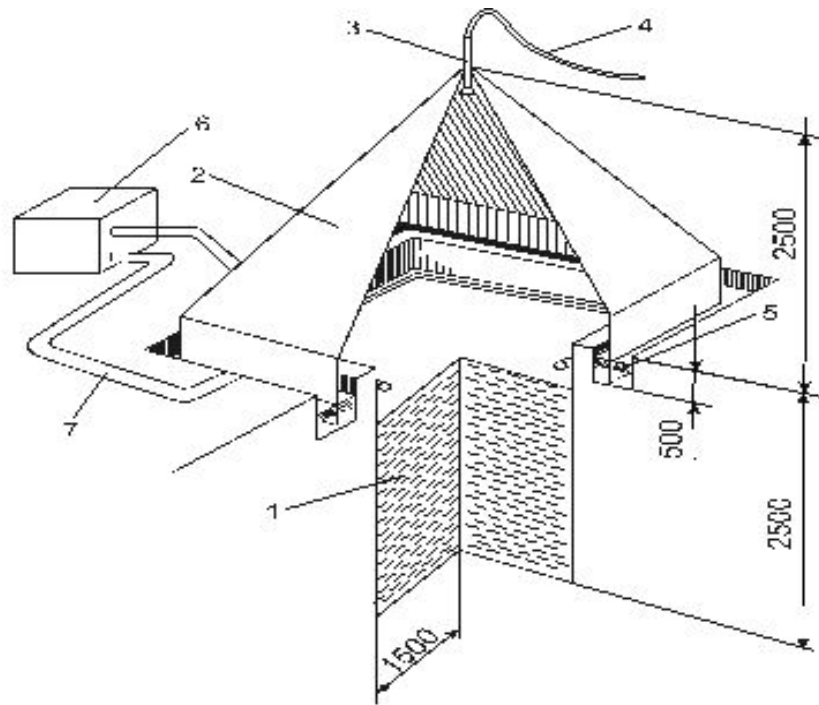


Рис. 8.5. Схема установки для получения биогаза с плавающим пирамидальным колоколом.

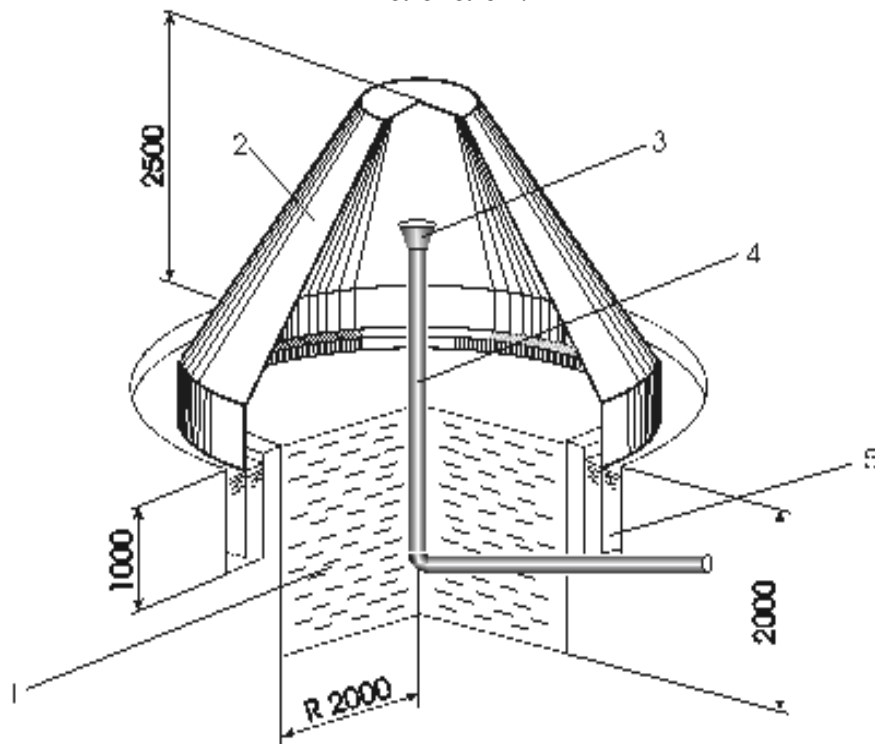


Рис. 8.6 Схема установки для получения биогаза с коническим колоколом.

На рис. 8.7 [ОАД06] изображена биогазовая установка, так называемая «дворовая», широко распространенная в Китае. Биогазовая установка практически полностью закапывается под землю, над уровнем грунта (7) выступает только крышка и дополнительная емкость биогазовой установки. Такое расположение биогазогенератора (метантенка) позволяет поддерживать относительно постоянную температуру в независимости от

сезона, установка выполнена из бетона, который значительно удешевляет ее. Загрузка и выгрузка биомассы осуществляется в ручную через крышку (5). Работа метантенка и дополнительной емкости осуществляется по принципу сообщающегося сосуда. При выработке газа и соответственно увеличении его объема и давления, часть биомассы выталкивается через сообщающийся сосуд в дополнительную емкость. Объем биомассы в дополнительной емкости является мерой определения количества биогаза, выработанного в метантенке.

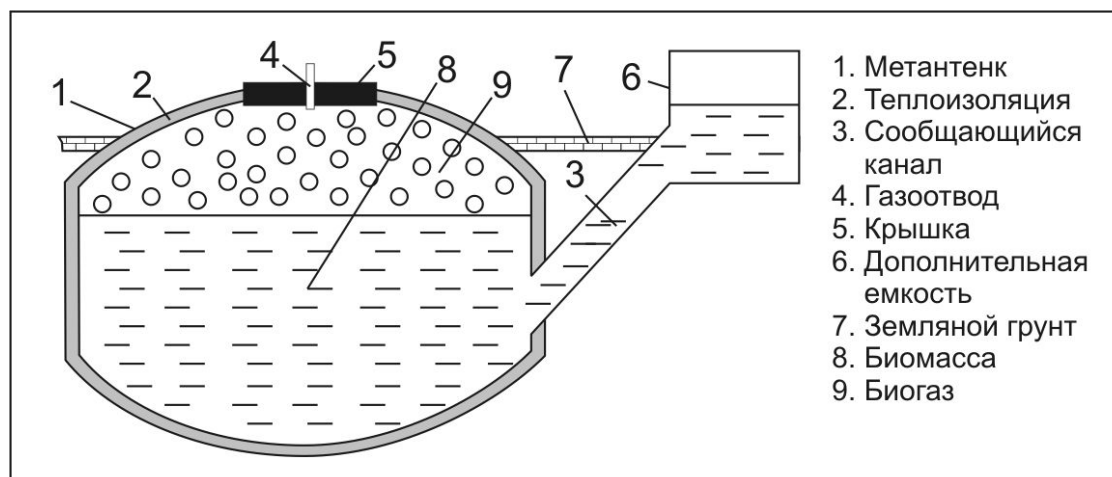


Рис.8.7 Биогазовая, дворовая, установка

*Промышленные биогазовые установки.* Большие промышленные биогазовые установки предназначены для переработки отходов животноводства, сельского хозяйства и органического мусора.

### 8.5 Вопросы и примеры решения задач

1. Что такое биомасса?
2. Какие возможности получения энергии из биомассы Вы знаете?
3. Что относится к твердому биотопливу?
4. Что такой пеллет, его энергетическая характеристика по сравнению с дровами?
5. Какие виды жидкого биотоплива Вы знаете?
6. Что такое биодизель?
7. Газообразное биотопливо?
8. Получение газообразного биотоплива.

*Задача №1.* Хозяйство содержит 10 голов крупного рогатого скота (КРС), 20 свиней и 35 кур. Объем суточного количества экскрементов и его влажность от КРС - 55 кг (влажность 85%), от свиньи - 4,5 кг (влажность 85%), от курицы - 0,17 кг (влажность 75%). Определить суточную производительность биогазовой установки, работающей на данном сырье.

*Решение:*



1. Определим суточное количество экскрементов для данного хозяйства:

от 10 голов КРС

$$M_{крс} = 10 \cdot 55 = 550 \text{ кг}$$

от 20 свиней

$$M_{свиней} = 20 \cdot 4,5 = 90 \text{ кг}$$

от 35 кур

$$M_{кур} = 10 \cdot 0,17 = 5,95 \text{ кг}$$

2. Используя влажность экскрементов, определим процентное содержание сухого вещества:

для КРС

$$m(\%)_{крс} = 100 - 85 = 15$$

для свиней

$$m(\%)_{свиней} = 100 - 85 = 15$$

от 35 кур

$$m(\%)_{кур} = 100 - 75 = 25$$

3. Определим суточную массу сухого вещества экскрементов с помощью пропорции (кг):

$$M_{крс} \rightarrow 100\%$$

$$m_{крс} = \frac{M_{крс} \cdot m(\%)_{крс}}{100} = \frac{550 \cdot 15}{100} = 82,5$$

$$m_{крс} \rightarrow m(\%)_{крс}$$

$$m_{свиней} = \frac{M_{свиней} \cdot m(\%)_{свиней}}{100} = \frac{90 \cdot 15}{100} = 13,5$$

$$m_{кур} = \frac{M_{кур} \cdot m(\%)_{кур}}{100} = \frac{5,95 \cdot 25}{100} = 1,49$$

4. Согласно табл. 8.6, выход биогаза с одного килограмма сухого вещества: из навоза КРС равен 0,250-0,340 м<sup>3</sup>, для задачи примем 0,3 м<sup>3</sup>; из свиного навоза - 0,340-0,580 м<sup>3</sup>, для задачи примем 0,45 м<sup>3</sup>; из куриного помета - 0,310-0,620 м<sup>3</sup>, для решения примем 0,5 м<sup>3</sup>.

5. Определим суточную производительность биогазовой установки:

$$V_{биогаз} = 0,3 \cdot m_{крс} + 0,45 \cdot m_{свиней} + 0,5 \cdot m_{кур} = 0,3 \cdot 82,5 + 0,45 \cdot 13,5 + 0,5 \cdot 1,49 = 37,5 \text{ м}^3$$

## ГЛАВА 9. ТЕПЛОВОЙ НАСОС

### 9.1 Понятие «тепловой насос»

*Тепловой насос* - это устройство, позволяющее «выкачивать» (преобразовывать) тепловую энергию из низко потенциальных источников тепла. Под низко потенциальными источниками тепла подразумеваются источники тепла с низкой температурой. Например в качестве низко потенциального источника можно использовать любой источник, даже с температурой, близкой к 0 °С, и с помощью теплового насоса преобразовывать эту энергию для обогрева дома зимой. К низко потенциальным источникам можно отнести тепло земли или грунта, подземные, термальные воды и наружный воздух.

Согласно второму закону термодинамики, тепло самостоятельно не может переходить от менее нагретого тела к более нагретому. Тем не менее, тепловой насос не противоречит этому закону, а для того, чтобы состоялся переход от менее нагретого тела к более нагретому, необходимо произвести работу, например, механическую работу компрессора в компрессионных тепловых насосах.

Процесс, протекающий в тепловом насосе, подобен обратному термодинамическому процессу холодильника. В холодильных установках в испарители забирается тепло от овощей, фруктов и через радиатор, который обычно находится в задней части холодильника, это тепло передается в комнату. Таким образом, домашний холодильник можно рассматривать как маломощный обогреватель для дома [Reb02].

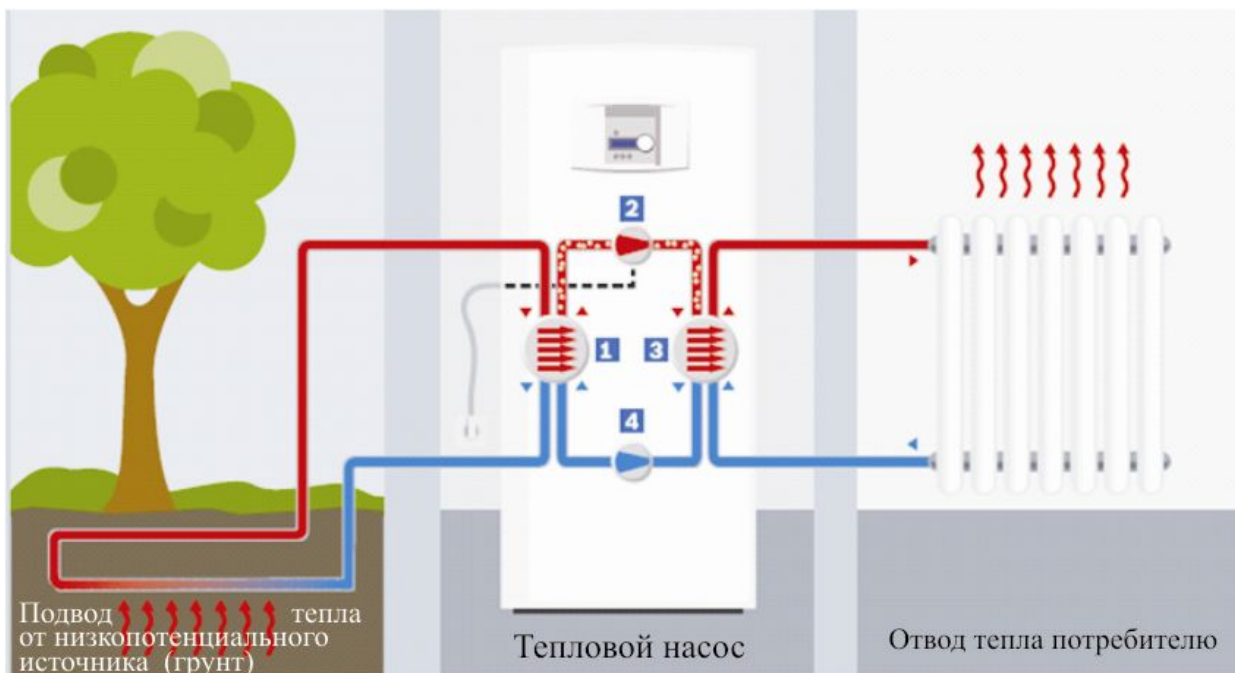


Рис.9.1 Тепловой насос

На рис.9.1 [ТЕП] схематически показан тепловой насос, который использует энергию низко потенциального источника – грунта (слева) и доставляет тепловую энергию (справа) потребителю. Тепловой насос делает возможным использование источника энергии с низкой температурой, преобразовывая ее в тепловую энергию с высокой температурой. На этом рисунке (рис.9.1) пронумерованы основные компоненты теплового насоса: 1-испаритель, 2-компрессор, 3-конденсатор, 4- дроссель, которые будут подробно рассмотрены ниже.

Существуют различные варианты классификации тепловых насосов: по функциям назначения (для горячего водоснабжения или отопления), по принципу действий. Последние подразделяются на:

- а) компрессионные тепловые насосы;
- б) абсорбционные тепловые насосы;
- в) адсорбционные тепловые насосы.

## 9.2 Компрессионные тепловые насосы

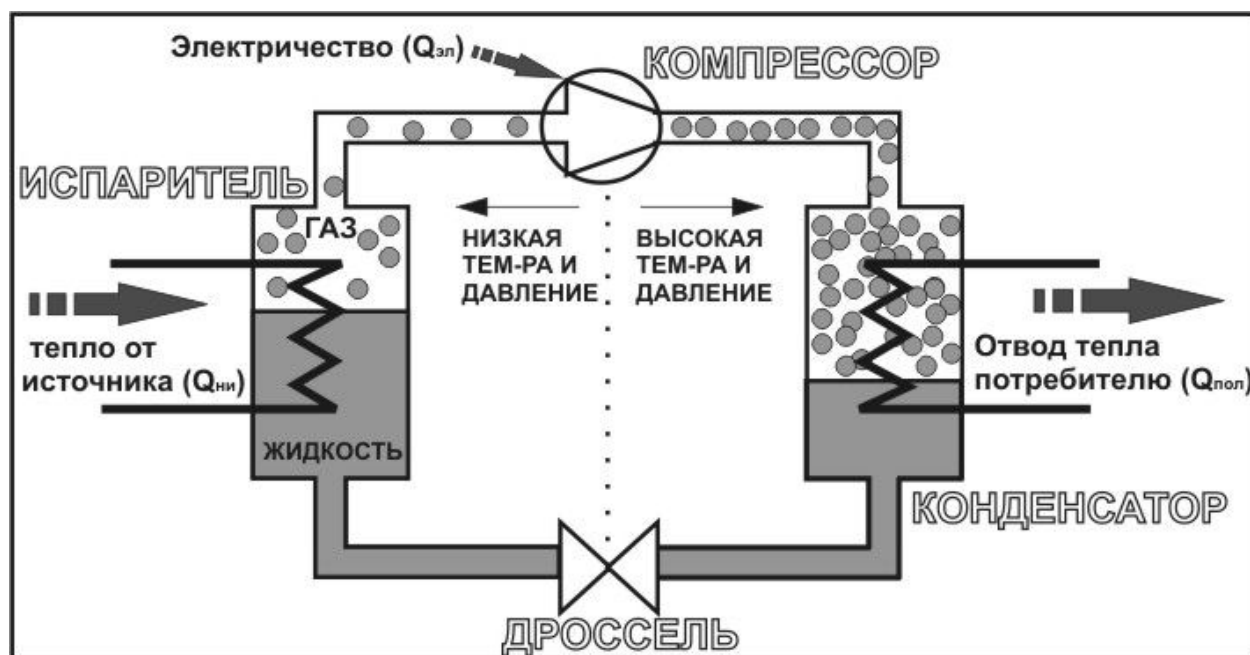


Рис.9.2 Принципиальная схема компрессионного теплового насоса.

Компрессионный тепловой насос состоит из следующих основных последовательно соединенных трубопроводами компонентов: *испаритель, компрессор, конденсатор и дроссель*. В замкнутом контуре циркулирует рабочая жидкость (*хладагент*), которая осуществляет «транспортировку» тепловой энергии. Хладагент имеет низкую температуру кипения и, следовательно, парообразования. При выборе хладагента должны выполняться требования: температура парообразования хладагента должна быть ниже температуры низко потенциального источника; экологическая безопасность; нетоксичность.

*Испаритель.* Хладагент, имеющий низкие температуру и давление, поступает в испаритель в жидком состоянии. Как уже было описано выше температура парообразования хладагента при данном давлении находится ниже температуры низко потенциального источника энергии. Через теплообменник испарителя происходит теплообмен между хладагентом и низко потенциальным источником. Таким образом, хладагент, поглощая тепловую энергию, кипит и испаряется, переходя в газообразное состояние. В испарителе жидкий хладагент меняет агрегатное состояние и превращается в газ. Далее газообразный хладагент поступает в компрессор.

*Компрессор.* В компрессоре происходит сжатие газообразного хладагента при помощи внешне подведенной механической энергии (механическая энергия получена из электрической). После сжатия происходит повышение давления и температуры хладагента. Подобный физический эффект называется *дроссельным эффектом Джоуля-Томсона*. Следует еще раз подчеркнуть, что повышение температуры газообразного хладагента происходит в результате изменения его состояния (изменения давления), а происходящий в компрессоре термодинамический процесс является *адиабатным (без подвода тепла)*. На выходе из компрессора давление и температура хладагента повысились, температура в зависимости от производительности компрессора может достигать 80 °С.

*Конденсатор.* После компрессора газообразный хладагент, имеющий высокие температуру и давление, поступает в конденсатор. В конденсаторе через теплообменник происходит отвод тепла потребителю, например, на горячее водоснабжение или отопление. Хладагент, теряя тепловую энергию, конденсируется и полностью переходит в жидкое состояние. Жидкий хладагент далее направляется к дросселю.

*Дроссель.* В дросселе жидкообразный хладагент расширяется пока его давление не уравнивается с давлением в испарителе. Таким образом, происходит замкнутый термодинамический процесс в тепловом насосе.

На рис.9.3 изображен термодинамический цикл с механической компрессией пара на  $Ts$  (температура – энтропия) и  $ph$  (давление-энтальпия) диаграммах. Процессы, изображенные на диаграммах, являются идеальными для лучшего понимания принципа работы теплового насоса. Как видно из обеих диаграмм, испарение хладагента происходит в испарителе при постоянной температуре и постоянном давлении, соответствует отрезку между точками 1-2. То есть энергия низко потенциального источника тратится на изменение агрегатного состояния хладагента, а именно перехода его из жидкого состояния в газообразное. В точке 2 хладагент в газообразном состоянии поступает в компрессор. В компрессоре происходит сжатие газообразного хладагента (отрезок 2-3) при постоянной температуре. При сжатии газа изменяется его состояние. Как уже было отмечено выше, повышается не только давление, но и температура за счет дроссельного эффекта Джоуля-Томсона. Особенно на  $Ts$  диаграмме видно увеличение температуры (с точки 2 на 3) за счет работы компрессора. Из компрессора (точки 3) перегретый пар направляется в конденсатор. Через теплообменник

конденсатора тепловая энергия хладагента передается потребителю, за счет чего происходит его конденсация при постоянном давлении, это соответствует отрезку 3-4. Таким образом, в конденсаторе весь газообразный хладагент переходит снова в жидкое состояние. Точка 4 соответствует состоянию хладагента перед дросселем. В дросселе происходит адиабатическое дросселирование, сопровождающееся неизменной энтальпией, за счет чего происходит понижение давления хладагента. Данный процесс изображается на  $p-h$  – диаграмме вертикальной линией 1-4.

Преимущество  $p-h$ - диаграммы заключается в том, что по термодинамическому циклу можно оценить энергетическую характеристику теплового насоса. Разница энтальпий ( $h_3-h_1$ ) есть энергия, подводимая потребителю, а разница энтальпий ( $h_3-h_2$ ) соответствует работе сжатия в компрессоре. Отношение подводимой энергии потребителю к затраченной энергии на привод компрессора есть величина, называемая *коэффициент преобразования (КОП)*.

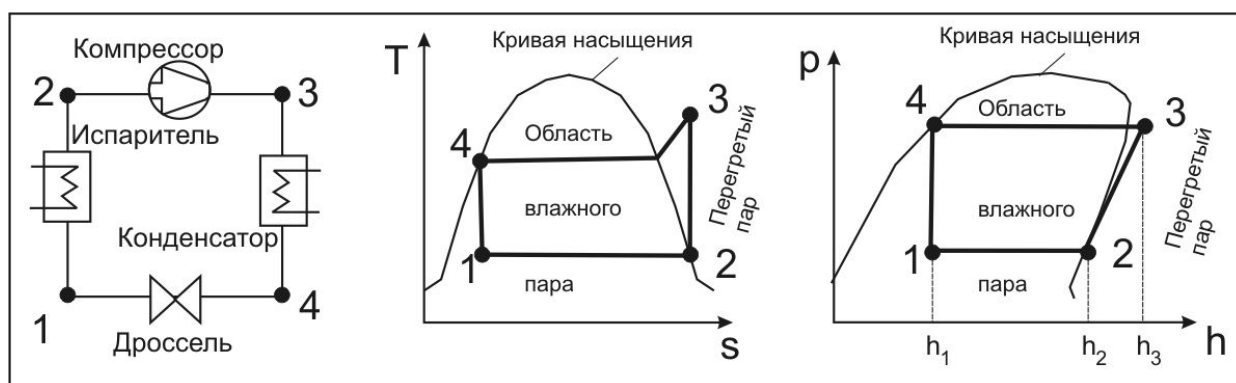


Рис.9.3 Идеальный термодинамический процесс теплонасосной установки

Основное отличие идеального термодинамического цикла от реального связано с потерями, а также технологическими требованиями к компонентам, например, к компрессору (рис.9.4). В реальном цикле газообразный хладагент, поступающий в компрессор, должен быть сухим и немного перегретым паром. Перегрев обеспечивает безопасную работу компрессору, гарантируя предотвращение попадания капель жидкости. При этом пар становится более разреженным, что отражается на компрессоре, который для обеспечения реального цикла должен быть мощнее. Однако, более серьезная проблема состоит в повышении температуры на выходе из компрессора, которая ограничивается стойкостью выхлопных клапанов. В итоге в реальном цикле газообразный хладагент поступает в компрессор с параметрами точки 2', а не как было указано в идеальном случае 2.

Другое существенное отклонение от идеализированного цикла определяется КПД компрессора. Из-за теплообмена между хладагентом и компрессором и необратимости течения внутри компрессора, повышение энтальпии в нем больше, чем в идеализированном цикле ( $p-h$  диаграмма,

точка 3'), что так же повышает выходную температуру (Ts диаграмма, точка 3').

Потери имеются и в других элементах рабочего цикла. За счет сопротивлений теплообменника, давление хладагента в нем падает. Влияние этого падения давления проявляется в отклонении от изотермических условий при теплообмене (наклон линий 1'2' и 3'4').

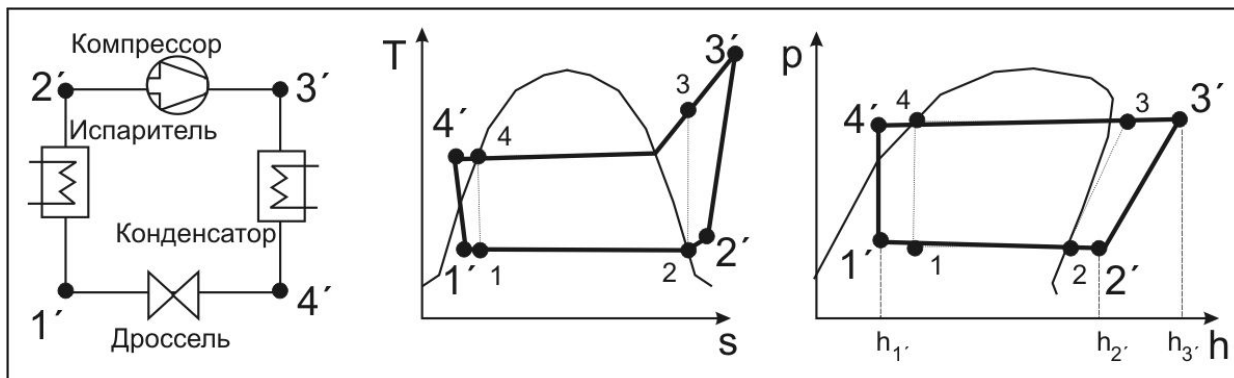


Рис.9.4 Реальный термодинамический процесс теплонасосной установки

Последнее отклонение от реального цикла, которое здесь рассматривается, связано с переохлаждением. В идеальном цикле дросселирование начиналось с точки 3 на левой пограничной кривой. Однако любые потери в трубопроводах между конденсатором и дросселем вызывают некоторое испарение, что ухудшает работу дросселя. Поэтому на практике желательно ввести переохлаждение до точки 4'. Переохлаждение также снижает долю пара, поступающего в испаритель.

### 9.3 Абсорбционные тепловые насосы

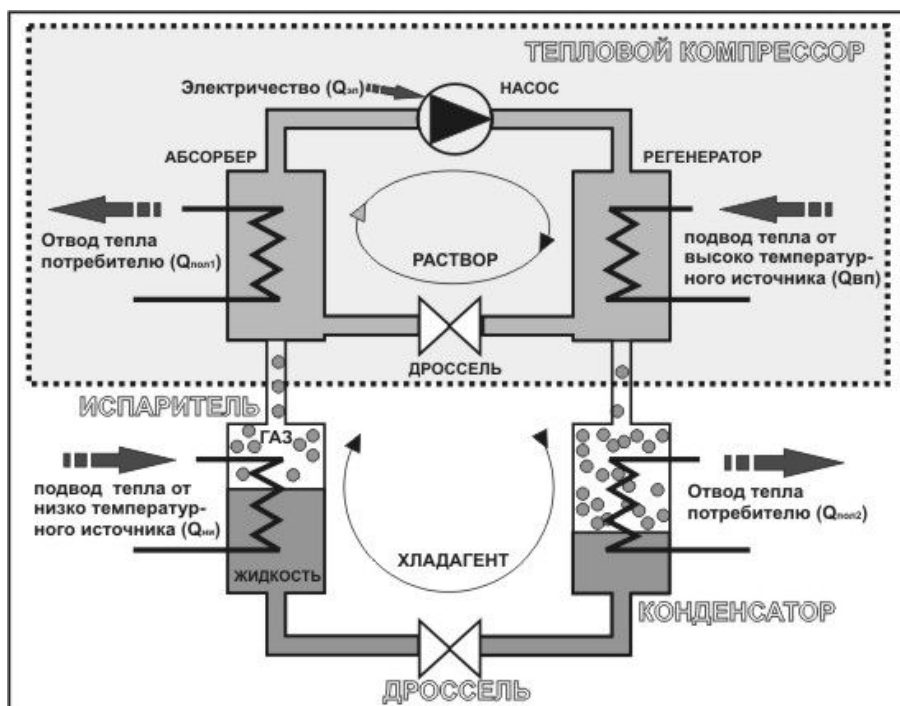


Рис.9.5 Принципиальная схема абсорбционного теплового насоса.

Абсорбционные тепловые насосы схематически состоят из тех же компонентов, что и компрессионные тепловые насосы. Главное отличие заключается в том, что вместо механического компрессора здесь применен дополнительный контур, заменяющий механическую компрессию пара как в парокондиционерном тепловом насосе. Дополнительный замкнутый контур состоит из абсорбера, насоса, регенератора и дросселя.

Принцип работы абсорбционного теплового насоса заключается в следующем: хладагент (обычно используют аммиак -  $NH_3$ ) поступает в испаритель. В испарителе хладагент, поглощая энергию низкопотенциального (низкотемпературного) источника, испаряется и поступает в абсорбер.

В абсорбере газообразный хладагент ( $NH_3$ ) поглощается абсорбентом (растворителем), например, водой. Классической комбинацией хладагента/абсорбента соответственно являются аммиак ( $NH_3$ )/вода ( $H_2O$ ) и вода ( $H_2O$ )/бромид лития ( $LiBr$ ) [Kal06]. Процесс поглощения газов или жидкости другими жидкостями называется процессом сорбции или абсорбции. При протекании данного процесса происходит выделение скрытого тепла парообразования ( $Q_{нопл}$ ), которое передается через теплообменник потребителю. Далее раствор (вода-аммиак) насосом перекачивается в регенератор. Насос затрачивает меньше электрической энергии по сравнению с компрессором в компрессионном тепловом насосе, так как на перекачку жидкости требуется меньше энергии, чем на сжатие газа до высокого давления.

В регенераторе происходит разделение раствора на компоненты (аммиак и воду). Для этого необходимо подвести высокотемпературную тепловую энергию. Высокотемпературная тепловая энергия может быть получена с помощью сжигания углеводородного топлива, а также с помощью солнечной или геотермальной энергии. Температура парообразования у хладагента и растворителя различная, причем у хладагента она ниже. Следовательно, при нагревании сначала испаряется хладагент, который отделяется от растворителя. Хладагент, испаряясь из раствора, поступает в конденсатор. А жидкий растворитель попадает в абсорбер через дроссель, где меняется его давление расширением объема до давления в абсорбере.

В конденсаторе происходит передача тепловой энергии через теплообменник потребителю, а соответственно и конденсация хладагента. Сконденсировавшийся хладагент поступает в дроссель, где его давление расширением доводится до давления в испарителе. И так процесс продолжается далее по описанному циклу.

В данное время проводятся исследования на внедрение абсорбционных тепловых насосов, использующих солнечную энергию для охлаждения. Кондиционирование воздуха абсорбционными тепловыми насосами, использующими для регенерации раствора солнечную энергию, является очень перспективным направлением. С одной стороны, потребность выработки «холода» прямо пропорциональна доступному солнечному

излучению, с другой стороны, используется энергия возобновляемых источников энергии. Недостатком же является то, что аммиак является токсическим веществом, а также коррозионным к медным трубопроводам.

#### 9.4 Адсорбционные тепловые насосы

*Адсорбционные тепловые насосы* основаны на процессе *адсорбции* (поверхностное поглощение) водяных паров твердыми материалами (активированный уголь, силикагель или цеолит). При протекании процесса адсорбции, т.е. поглощения водяных паров твердыми материалами, выделяется тепловая энергия. Так как в качестве рабочей жидкости используется вода, то необходимо поддерживать сильное разрежение (вакуум), чтобы понизить температуру парообразования жидкости. При давлении 8,7 мбар температура испарения воды находится на уровне 5 °С, при давлении 6,1 мбар - 0 °С.

Эксплуатация адсорбционного теплового насоса происходит в 2 цикла. При протекании 1-го цикла процесса высокотемпературная тепловая энергия подводится к теплообменнику, где происходит испарение и отделение воды от *твердого вещества* (напр. цеолита). Твердым веществом – цеолитом покрыты внутренние стенки теплообменника. Далее вода поступает в другой теплообменник, где она, отдавая энергию потребителю, конденсируется. После того, как вся вода сконденсировалась в теплообменнике, начинается вторая фаза процесса. Прекращается подача тепловой энергии, подводимой для отделения воды от твердого вещества. Вода перемещается в теплообменник, куда подводится низкотемпературная тепловая энергия от внешнего источника. Вода, поглощая тепловую энергию, переходит в газообразное состояние и попадает в теплообменник, покрытый цеолитом. При поглощении последним пара происходит выделение энергии, которая передается потребителю. Преимущество адсорбционного теплового насоса в том, что он использует нетоксические материалы. В качестве источника высокотемпературной тепловой энергии можно использовать солнечную энергию или энергию сжигания биогаза. Однако, адсорбционные тепловые насосы являются капиталоемкими и используют дорогую технологию получения вакуума, поэтому адсорбционные тепловые насосы находятся сейчас на стадии изучения [Qua07].

#### 9.5 Величины, характеризующие тепловой насос

Согласно закону сохранения энергии, можно построить баланс энергий для теплового насоса (рис.9.1). Пренебрегая всеми потерями, происходящими в тепловом насосе, можно записать:

$$Q_{ни} + Q_{эл} = Q_{пол}, \quad (9.1)$$

где  $Q_{ни}$  - количество энергии, полученной от низкотемпературного низкопотенциального источника, кВт·час;  $Q_{эл}$  - количество энергии,



необходимое для питания компрессора, кВт·ч;  $Q_{пол}$  - полезная энергия, отданная потребителю, кВт·ч.

Мерой эффективности любого устройства является *коэффициент полезного действия* (КПД). Коэффициент полезного действия - это отношение полезной энергии к затраченной, которое всегда меньше единицы. Однако, для оценки теплового насоса зачастую используют понятие *коэффициент преобразования* (КОП).

Коэффициент преобразования теплового насоса - это отношение мощности полезной (полученной) энергии к мощности затраченной энергии, необходимой для работы теплового насоса. В качестве затраченной энергии для работы теплового насоса понимается энергия, необходимая для привода компрессора для компрессионного теплового насоса или для привода абсорбционного теплового насоса. Расчет КОП (без учета потерь преобразования, т.е. КПД=100%) осуществляется:

$$КОП = \frac{N_{пол}}{N_{эл}} = \frac{N_{эл} + N_{ни}}{N_{эл}} = 1 + \frac{N_{ни}}{N_{эл}}, \quad (9.2)$$

где  $N_{пол}$ ,  $N_{ни}$ ,  $N_{эл}$  соответственно - мощность полезной энергии, низкопотенциального источника и электрического привода на тепловой насос, Вт. Как видно, коэффициент преобразования теплового насоса всегда больше единицы. На практике применяются тепловые насосы с КОП, равным  $3 \div 4$ . Это означает, что можно получить в три или четыре раза больше тепловой мощности по сравнению с затраченной мощностью электрической энергии на привод теплового насоса. КПД теплового насоса - это отношение мощности полезной энергии к затраченной:

$$КПД = \frac{N_{пол}}{N_{зат}} = \frac{N_{пол}}{N_{эл} + N_{ни}}. \quad (9.3)$$

Сильное влияние на КОП оказывают: разница температур между низкопотенциальным тепловым источником и температурой отвода потребителю; применяемый хладагент; конструкция теплового насоса.

В зарубежной литературе также используется КОП теплового насоса за определенный промежуток времени. Для его расчета берется то же отношение, что и в формуле (9.2), однако энергии, затраченной в качестве низкопотенциального источника, и электроэнергии, затраченной на привод, полученной энергии. Обычно оценивают КОП за один год.

## 9.6 Компоненты теплового насоса

Тепловой насос представляет собой совокупность компонентов, связанных между собой и служащих для получения тепловой энергии из низкопотенциального источника. В состав теплового насоса входят теплообменники испарителя и конденсатора, компрессор, дроссель и, конечно же, хладагент.

*Компрессор.* Компрессором называют воздуходувную машину, предназначенную для сжатия и подачи воздуха или какого-либо газа. Компрессоры для теплонасосных установок делятся на две группы: для влажного и сухого пара. Влажным будет считаться пар с концентрацией частиц масла более 15 на 1 млн. В некоторых случаях они занимают до 20% объема. В сухих компрессорах масло само по себе не работает и попадает в компрессор только из-за утечек через уплотнения (обычно менее 5 частиц на 1 млн.).

Поршневой компрессор - самый распространенный тип в широком диапазоне мощностей, для сжатия воздуха в холодильных машинах и тепловых насосах. Поршневой компрессор относится к объемным компрессорам, особенностью которых является простота конструкции. Объемные компрессоры работают по принципу вытеснения, когда давление перемещаемой среды повышается в результате сжатия. В таких компрессорах среда перемещается путем периодического изменения объема камеры, попеременно сообщаясь с входом и выходом компрессора. Помимо поршневого компрессора к ним относятся радиально поршневые, шибберные и винтовые компрессоры.

Другой вид - динамические компрессоры работают по принципу силового действия на перемещаемую среду. В таких компрессорах среда под воздействием гидродинамических сил перемещается в камере (незамкнутом объеме), постоянно сообщаясь с входом и выходом компрессора. К ним относятся лопастные (радиальные, центробежные, осевые) нагнетатели и нагнетатели трения (вихревые, дисковые, струйные). Лопастными называют компрессоры, в которых среда перемещается за счет энергии, передаваемой ей при обтекании лопастей рабочего колеса. Лопастные компрессоры объединяют две большие группы компрессоров: центробежные и осевые. В центробежных компрессорах среда перемещается через рабочее колесо от центра к периферии, а в осевых - через рабочее колесо в направлении его оси.

*Теплообменники.* Теплообменником (теплообменный аппарат) называется устройство, предназначенное для обмена теплотой между греющей и обогреваемой рабочими средами, которые называются теплоносителем. В тепловых насосах теплообменники находятся в испарителе и в конденсаторе. В испарителе происходит теплообмен между низко потенциальным источником и хладагентом, в результате которого последний испаряется. В конденсаторе теплообмен осуществляется между хладагентом и зачастую водой или другим теплоносителем, которая, далее нагреваясь, поступает потребителю.

По назначению теплообменников различают: подогреватели, конденсаторы, охладители, испарители. По принципу действия бывают поверхностные и смешивающие теплообменники.

Для тепловых насосов в основном применяются поверхностные теплообменники. В подобных теплообменниках теплоносители огорожены друг от друга твердыми стенками, которые частично или полностью

участвуют в процессе теплообмена. Поверхностью нагрева называют часть поверхности этих стенок, через которую передается теплота.

К поверхностным теплообменникам относятся кожухотрубчатые, секционные, пластинчатые и другие.

*Дроссель (расширительный вентиль)*. Дроссель обеспечивает изменения давления от конденсатора до давления испарителя. Выбор дросселей зависит от теплоносителя, от производительности компрессора. Различают термостатические, электрические дроссели и капиллярные трубы.

*Теплоноситель (хладагент)*. Существует огромное количество разных хладагентов, используемых для тепловых насосов. В прошлом широкое применение находили галоидоуглеродные соединения, известные по их торговым наименованиям: фреон, арктон, генетрон. Подобные соединения очень сильно воздействуют на озоновый слой и приводят к его разрушению. В результате появляются озоновые дыры, и в тех местах наблюдается сильное воздействие ультрафиолетового излучения. В настоящее время, в эпоху энергетического и экологического кризисов, к теплоносителям предъявляются жесткие критерии. В некоторых странах галоидоуглеродные соединения уже запрещены к использованию в современных теплонасосных установках. У хладагентов имеется свой шифр, который состоит из буквы R (от англ. «Refrigerant» - хладагент) и цифровой- буквенный набор, например R12, R407. Цифры следующие после R, имеют неслучайный характер. Первая цифра после буквы означает количество углерода (C), уменьшенного на один в хладагенте. Вторая цифра показывает количество водорода (H), увеличенного на один. Третья цифра показывает содержание фтора (F) в этом хладагенте. Например, химическое соединение R12, известный как дихлордифторметан, выглядит  $CCl_2F_2$ .

В табл. 9.1 [Ka106] представлены некоторые хладагенты. С английского аббревиатура ODP (Ozone-Depleting-Potencial) означает «потенциал разрушения озона». Потенциал разрушения озона - это относительная величина, за эталон принят хладагента R11 у которого ODP=1. Чем больше ODP, тем сильнее хладагент может воздействовать на озоновый слой. GWP (англ. «Global-Warming Potencial») означает «потенциал глобального потепления». Данная величина тоже имеет относительный характер, и выражается относительно углекислого газа ( $CO_2$ ), GWP которого равно 1. Чем больше GWP у вещества, тем сильнее оно в атмосфере вызывает глобальное потепление.

С точки зрения безопасности, такие горючие вещества как пропан, пропилен нельзя применять для теплонасосных установок, служащих для теплоснабжения жилищных зданий. Аммиак нежелателен из-за его токсичности, которая выше только у сернистого ангидрида. Несмотря на это, аммиак все же применялся довольно широко в домашних холодильниках, которые имеют не малый опыт эксплуатации.

Табл.9.1

Хладагенты

Шифр	Название	Формула	Тем-ра кипения	ODP	GWP
R12	Дихлордифторметан	$CCl_2F_2$	-30°C	0,9	8500
R502	Смесь R22/R115 (48,8%/51,2%)		-46°C	0,23	5590
R22	Хлордифторметан	$CHClF_2$	-41°C	0,05	1700
R134a	Тетрафторэтан	$C_2H_2F_4$	-26°C	0	1300
R407C	Смесь R32/R125/R134 (23%/25%/52%)		-44°C	0	1610
R410A	Смесь R32/R125 (50%/50%)		-51°C	2	1890
R290	Пропан	$C_3H_8$	-42°C	0	3
R1270	Пропилен	$C_3H_6$	-48°C	0	3
R717	Аммиак	$NH_3$	-33°C	0	0
R744	Углекислый газ	$CO_2$	-57°C	0	1

Если систематизировать в целом, то хладагент должен иметь температуру кипения ниже, чем температура низко потенциального источника, быть не токсичным, относительно экологическим и безопасным.

## 9.6 Низко потенциальные источники энергий для теплового насоса

Как было указано выше, в качестве низко потенциальных тепловых источников могут использовать любые источники, имеющие низкую температуру. К низко потенциальным источникам можно отнести тепловую энергию земли, воды, солнечную энергию, воздух и все их производные рис.9.6.



Рис.9.6 Низкопотенциальные источники для теплового насоса.

Идеальный источник тепла должен давать стабильную высокую температуру в течение отопительного сезона, не быть коррозионным и загрязняющим, иметь благоприятные теплофизические характеристики, не требовать существенных инвестиций и расходов по обслуживанию. В большинстве случаев имеющийся источник тепла является ключевым

фактором, определяющим эксплуатационные характеристики теплового насоса.

*Земля.* При укладке контура в землю желательно использовать участок с влажным грунтом, лучше всего с близкими грунтовыми водами. Использование сухого грунта тоже возможно, но это приводит к увеличению длины контура. Трубопровод должен быть зарыт на глубину примерно 1 м, расстояние между соседними трубопроводами - примерно 0.8-1.0 м.

Грунт применяют в качестве естественного источника тепла для зимнего отопления и летнего кондиционирования. Змеевики испарителя закладывают в грунт, причем выгодно используют его зонную аккумулирующую способность. Величины теплопередачи в грунте главным образом зависят от его влажности. В табл. 9.2 представлен возможный съем мощности с 1 м горизонтального коллектора в зависимости от грунта.

Табл.9.2

Энергетические характеристики некоторых грунтов

Наименование	Съем тепла с 1 м коллектора, Вт/м
сухой песок	10 Вт/м
сухая глина	20 Вт/м
влажная глина	25 Вт/м
глина с большим содержанием воды	35 Вт/м

*Вода.* Наиболее целесообразно применение отходов теплой воды промышленных предприятий, в том числе циркуляционной воды тепловых электростанций. Кроме того, используют также естественные горячие источники в курортных местностях.

Речная и озерная вода с теоретической точки зрения представляется весьма привлекательным источником тепла, но имеет один существенный недостаток - чрезвычайно низкую температуру в зимний период (она может приближаться к 0 °С). Если использовать воду рек, озер и морей, то в зимний период она может замерзать на стенках испарителя.

Морская вода представляется в некоторых случаях отличным источником тепла и используется в основном в средних и крупных системах. На глубине от 25 до 50 м морская вода имеет постоянную температуру в диапазоне от 5 до 8 °С. И, как правило, проблем с образованием льда не возникает, поскольку точка замерзания здесь от -2 до -10 °С.

*Воздух.* Наружный воздух, будучи совершенно бесплатным и общедоступным, является наиболее предпочитаемым источником тепла. В условиях теплого и влажного климата на поверхности испарителя в диапазоне от 0 до 6 °С образуется изморось, что ведет к снижению мощности и производительности теплового насоса. Иней уменьшает площадь свободной поверхности и препятствует прохождению воздуха. Как следствие, снижается температура испарения, что, в свою очередь, способствует нарастанию инея и дальнейшему неуклонному снижению производительности вплоть до возможной полной остановки агрегата. Другой воздушный источник тепла в жилых и торгово-административных

сооружениях - отводимый вентиляционный воздух. Тепловой насос регенерирует тепло из отводимого воздуха и обеспечивает приготовление горячей воды или теплого воздуха для отопления помещений. В этом случае, однако, требуется постоянное проветривание в течение всего отопительного сезона или даже целого года, если предусмотрено кондиционирование помещений в летний период. Существуют аппараты, в которых конструктивно изначально заложена возможность использования и отводимого вентиляционного, и наружного воздуха. В некоторых случаях тепловые насосы, применяющие отводимый воздух, используются в комбинации с рекуператорами "воздух-воздух".

## 9.7 Применение тепловых насосов

Тепловые насосы применяются в основном для автономных потребителей для горячего водоснабжения или отопления. На рис.9.6 представлены системы отопления и горячего водоснабжения с помощью теплового насоса, использующего энергию грунта. У любого частного дома всегда имеется участок земли, куда и могут быть установлены *зонд или коллектор*. Горизонтальный коллектор представляет собой длинную трубу, зачастую сделанную из полиэтилена. Данный коллектор укладывается под слоем грунта, расположенным на глубине 1 м. Зонд или вертикальный коллектор устанавливается в скважину глубиной 60 – 200 м. В этом случае достаточно маленького участка земли. Участок, под которым находится либо коллектор, либо зонд, желательно не застраивать для пополнения энергии грунта за счет приходящей солнечной радиации.

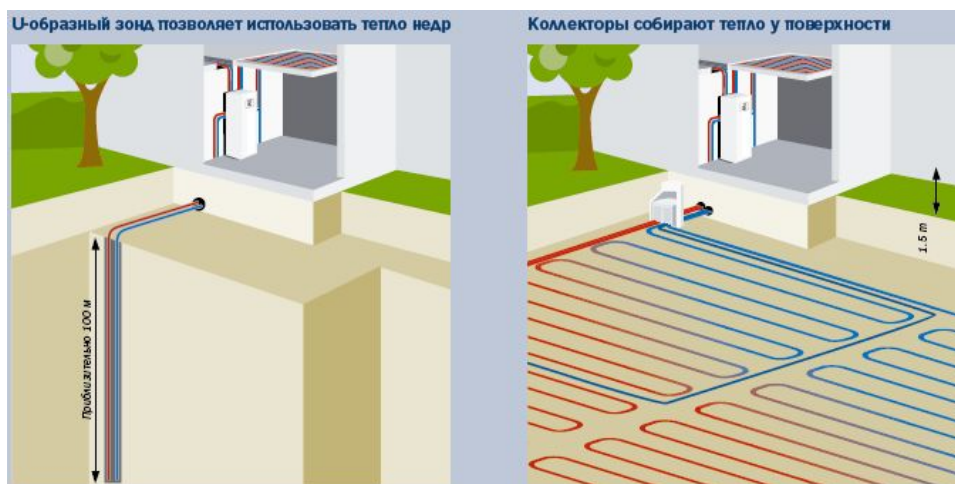


Рис.9.6 Системы горячего водоснабжения и отопления с помощью тепловых насосов

Имеются и другие системы, применяющие тепловой насос, использующие окружающую среду или сточные воды как **низкопотенциальный** источник. Особенно эффективным является обеспечение горячего водоснабжения и отопления за счет отработанных сточных вод, например, в банях, саунах, где имеются огромные холостые сбросы тепловой энергии **[ТЕП]**.

## 9.8 Вопросы и примеры решения задач

1. Что такое тепловой насос?
2. Какие компоненты входят в состав теплового насоса?
3. Опишите компрессионный тепловой насос.
4. Основные отличия абсорбционного теплового насоса.
5. Для чего необходим дроссель?
6. Функция испарителя.
7. Что такое конденсатор?
8. Чем отличается реальный термодинамический цикл от идеального?
9. Что такое дроссельный эффект Джоуля-Томсона?
10. Что такое коэффициент преобразования?
11. Как рассчитать КПД теплового насоса?
12. Какие низкопотенциальные источники используются для теплового насоса?

*Задача №1.* Коттедж, установленный на берегу озера Иссык-Куль, имеет площадь 20 м<sup>2</sup>. Теплопотребность коттеджа составляет 12 кВт. В коттедж установлено половое отопление, температура которого должна быть не менее 35 °С. Минимальная температура теплоносителя – 0 °С. Для обогрева здания выбран тепловой насос мощностью 14,5 кВт, затрачивающий на сжатие фреона 3,22 кВт. В качестве низко потенциального источника энергии используется энергия грунта - сухая глина. Определите для данного теплонасоса длину горизонтального коллектора.

*Решение:*

1. Рассчитаем тепловую мощность коллектора:

$$N_{кол} = 14,5 - 3,22 = 11,28 \text{ (кВт)}.$$

2. По табл. (9.2) определим приблизительный съем тепла с 1 м коллектора.

Для сухой глины 20 Вт/м.

3. Определим суммарную длину труб, необходимую для покрытия данной мощности:

$$l_{кол} = N_{кол} / q = 11,28 / 0,02 = 564 \text{ (м)}.$$

*Задача №2.* По условиям задачи №1 рассчитать необходимую площадь для укладки коллектора, а также расход теплоносителя в контуре. Известно, что в качестве теплоносителя первичного контура использовался 25-процентный раствор гликоля, теплоемкость которого при температуре 0 °С составляет 3,7 кДж/кг·К, а плотность – 1050 кг/м<sup>3</sup>.

*Решение:*

1. Рассчитаем площадь участка, приняв, что шаг укладки (b) будет 0,8 м:

$$A_{уч} = l_{кол} \cdot b = 564 \cdot 0,8 = 451,2 \text{ , (м}^2\text{)}.$$

2. Определим общий расход гликолевого раствора:

$$V_{мен} = 3600 \cdot N_{кол} / (\rho_{мен} \cdot c_{мен} \cdot t) = 3600 \cdot 11,28 / (1050 \cdot 3,7 \cdot 3) = 3,51 \text{ (м}^3\text{/ч)}.$$

*Задача №3.* Вывести связь коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента полезного действия (КОП) для теплового насоса.

*Решение:*

1. Воспользуемся формулами (9.2) и (9.3):

$$КОП = \frac{N_{пол}}{N_{эл}} = \frac{N_{эл} + N_{ни}}{N_{эл}} = 1 + \frac{N_{ни}}{N_{эл}};$$

$$КПД = \frac{N_{пол}}{N_{зат}} = \frac{N_{пол}}{N_{эл} + N_{ни}}.$$

2. Для избежание путаницы напомним, что формула определения КОП была представлена без учета КПД. В реальности полезная энергия меньше, чем затраченная в связи с потерями. С учетом КПД формула (9.2) будет выглядеть так:

$$КОП = \frac{N_{пол}}{N_{эл}} = \frac{КПД(N_{эл} + N_{ни})}{N_{эл}} = КПД \left(1 + \frac{N_{ни}}{N_{эл}}\right).$$



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [Аге] Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Курс лекций.
- [Агн84] Агнихотри О., Гупта Б. Селективные поверхности солнечных установок. Москва, 1984.
- [Аве88] Аvezов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. Ташкент: Фан., 1988
- [Арт77] Артоболевский И.И. Политехнический словарь. Москва, 1977.
- [Баа82] Баадер В., Доне Е., Бренндефер М. Биогаз: теория и практика /Пер. с нем. – М.: Колос, 1982 – 148 с.
- [Бад09] Бадмаев Ю. Ц. Интенсивная технология анаэробной переработки навозных стоков свиноводства в условиях Республики Бурятия /Автореф. диссерт. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук – Улан-Удэ. – 2009. – 22 с.
- [Бот07] Ботпаев Р., Акпаралиев Р., Обозов А.Дж. Сравнительный анализ потенциала солнечной энергии в Бишкеке /Конференция «Энергетика: проблемы и развитие». Бишкек, 10.2007.
- [Био85] Биомасса как источник энергии. Пер с англ. /Под ред С. Соуфера, О. Заборски. – М.: Мир, 1985. - 368 с.
- [Вед06] Веденев А.Г., Веденева Т.А., ОА «Флюид». Биогазовые технологии в Кыргызской Республике. – Б.: Евро, 2006. – 90 с
- [Вем06] Веденев А.Г., Маслов А.Н. Строительство биогазовых установок. Бишкек, 2006.
- [ВИ308] Закон КР О возобновляемых источниках энергии: № 283, 31.12.08
- [Вис02] Виссарионов В.И., Волшаник В.В. Использование волновой энергии. Москва, 2002.
- [Вис08] Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. Солнечная энергетика. Москва, 2008.
- [Гел02] Гелетуа Г.Г., Кобзарь С.Г. Современные технологии анаэробного сбраживания биомассы (Обзор) /Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. - №4. – С. 3.
- [Гол79] Голубков Б.Н. и др. Теплотехническое оборудование и теплоснабжение промышленных предприятий. Энергия, 1979.
- [Даф77] Даффи Дж.А, Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. Москва, 1977.
- [Дем] «Демзона» - кыргызская версия программы ENSI Key Number.
- [Дуб88] Дубровский В., Виестур У. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. Рига: Зинатне, 1988.
- [Жаб09] Жабудаев Т.Ж. Гидроэнергетические установки. Бишкек, 2009.
- [Кал05] Калмыкова Ю., Герман А., Жирков В. Проект Биогаз, 2005, Карагандинский Экологический Музей.
- [Кар01] Каргиев В.М., Мартиросов С.М. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. Москва, 2001.
- [Кац67] Кацман М.М. Электрические машины и трансформаторы. М: Высшая школа, 1967.
- [Ков71] Ковалев Н.Н. Гидротурбины. Ленинград, 1971.
- [Коп00] Копылов И.К. Электрические машины. Москва, 2000.

- [Кор08] Корзникова М.В., Блохин А.Ю., Козлов Ю.П. Оценка степени конверсии органического вещества отходов животноводства и птицеводства в биогаз (на примере РФ). - Вестник ВГУ, серия: химия, биология, фармацевция, 2008. - № 2.
- [Кре75] Кремененцкий Н.Н., Штеренлихт Д.В. Гидравлика, 1975.
- [Лаб03] Лабейш В.Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Санкт-Петербург, 2003.
- [Льв74] Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974 .
- [Май82] Макмайкл Д., Рей Д. Тепловые насосы. Москва, 1982.
- [Мак81] Мак-Вейг. Применение солнечной энергии. М.: Энергоиздат, 1981.
- [Мал85] Малинин Н.К. Теоретические основы гидроэнергетики. Москва, 1985.
- [НПС89] Научно-прикладной справочник по климату СССР, Киргизская ССР, Л.:Гидрометеиздат, 1989.
- [НЭП08] Национальная энергетическая программа КР 2008-2010 г.г.
- [ОАД06] Обозов А.Дж. Возобновляемые источники энергии. Бишкек, 2006.
- [ОАД07] Обозов А.Дж., Тагайматова А.А. Преобразование солнечной энергии. Бишкек, 2007.
- [ОАД08] Обозов А.Дж., Кириллов В.В., Байтлеутова Д.К. Преобразование Энергии Ветра. Бишкек, 2008.
- [Обр88] Обрезков В.И. Гидроэнергетика. Москва, 1988.
- [Омо02] Оморов Р.О., Мусакожоев Ш.М., и др. Обзорная информация о современном состоянии и перспективах развития гидроэнергетики в КР. Бишкек, 2002.
- [Орг75] Орго В.Н. Гидротурбины. Ленинград, 1975.
- [Пан93] Панцхава Е.С., Кошкин Н.Л. Биоэнергетические установки по конверсии органических отходов в топливо и органические удобрения. – Теплоэнергетика, 1993. – № 4. – С. 20.
- [Пат08] Патент № 1178, заявка 20080020.1 от 20.02.2008.
- [Пле90] Плешка М.С., П.М. Вырлан. Теплонасосные гелиосистемы отопления и горячего водоснабжения зданий. Кишинев, 1990.
- [Пол09] Положение о порядке строительства, приемки и технологического присоединения малых гидроэлектростанций к электрическим сетям. - № 476, 28.07.09.
- [ПРГ07] О плане развития гидроэнергетики КР 2007 -2010
- [Рах97] Рахимов К.Р., Тулбердиев Ж.Т., Беяков Ю.П. Развитие энергетики Кыргызстана. Бишкек, 1997.
- [Рез89] Резниковский А.Ш. Гидрологические основы Гидроэнергетики. М.: Энергоиздат, 1989.
- [Реш09] Решетникова И.В. Разработка энергосберегающей электротехнологии сбраживания навоза с использованием объемного СВЧ – нагрева /Автореф. диссерт. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук – Ижевск. – 2009. – 22 с.
- [Рыж99] Рыжков К.В. 100 великих изобретений. М.: Вече, 1999.
- [СНП00] СНиП КР 23-02-00 Строительная климатология
- [Тва90] Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии.

- Москва, 1990.
- [ТЕП] Тепловой насос фирмы Bosch EHP LW/M
- [Хах07] Хахалева Л.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Ульяновск, 2007.
- [Bes] Beste D., Kälke M. Erneubaren Energien
- [Bio96] Biogas GTZ project «Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT)», Eshborn, Deutschland, 1996.
- [BMW95] BMWi 95
- [Bur01] Burton T., Sharpe D. «Wind Energy» Wiley 2001
- [CON] [www.conrad.de](http://www.conrad.de)
- [Chr89] Christoffer Jürgen «Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland», Deutscher Wetterdienst, № 147 1989
- [Dus08] Duschl-Graw «Regenerative Energien und Umwelt» Skript 2008
- [DWE] Danish Wind Energy Association. [www.windpower.org](http://www.windpower.org).
- [Eic01] Eicker U. «Solar technologies for Buildings», B.G.Tuebner 2001.
- [FME04] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear safety «Renewable Energy Sources Act» 2004.
- [Fra80] Frank R.Eldridge «Wind machines» second edition 1980.
- [Fun08] Funke Thomas, Dipl.-Ing. Rainer Kurz Доклад “Геотермия”, 2008.
- [Goe97] Goetzberger, A., Voß, B., Knobloch, J. «Sonnenenergie: Photovoltaik», Stuttgart, 1997.
- [Hac03] Hachne E., Drucek H. «Manuscript zur Vorlesung Solartechnik», Universitaet Stuttgart, 2003.
- [Hei06] Heier Siegfried «Wind Energy Conversion Systems» Wiley, 2006.
- [Her92] Hering E., Martin R. «Physik für Ingenieure», Düsseldorf, 1992.
- [Hof] Hoffman Volker «Energie aus Sonne, Wind und Meer» Leipzig, 1990.
- [Kal06] Kaltschmidt M., W.Streicher “Erneubaren Energien” 4 Auflage Springer, 2006.
- [Ker94] Kerschberger A. «Tarnsparente Waermedaemmung zur Gebaeude Heizung», Sttutgart, 1994.
- [KIZ00] Kipp a Zonen «Instruction Manuel Pyranometr CM 11», 2000.
- [Kjo01] Kjoele Arne “Hydropower in Norway”, Trondheim, 2001.
- [Man02] Manwell J.G., McGowan «Wind Energy Explained» Wiley, 2002.
- [Men07] Mendonca Miguel “Feed-IN Tariffs accelerating the Deployment of Renewable Energy”. London, 2007.
- [Met60] Meteororm 6.0, [www.meteororm.com](http://www.meteororm.com)
- [Mol90] Molly, Jens-Peter «Windenergie». Karlsruhe, 1990.
- [Muk99] Mukund R. Patel P «Wind and Solar power Systems» CRC Press, 1999.
- [NII] [www.niies.ru](http://www.niies.ru)
- [Pho06] «Photovoltaics design and Installation Manual», Solar Energy International, Canada, 2006.
- [Pla95] Platzer W. «Eigenschaften von tarnsparenten Waermedaemmmaterialien», Griesdorf, 1995.
- [Qua07] Quaschnig Volker “Regenerative Energiesysteme” 5 Auflage Hanser, 2007.
- [Reb02] Rebhan E. «Energiehandbuch». Springer, 2002.
- [REN08] REN 21 «Renewables, 2007; Global Status Report», 2008.

- [REN10] REN 21 «Renewables, 2010; Global Status Report» , 2010.
- [Roc01] Rockendorf G., Sillman R. «Solare Freibadbeheizung», 2001.
- [Sch93] Schmid, J. (Hrsg.): Photovoltaik - Strom aus der Sonne; C. F. Müller, Karlsruhe, 1993, 3. Auflage
- [Sch] <http://www.solarserver.de/lexikon/schwimmbadabsorber.html>
- [Sor04] Sorensen Bent «Renewable Energy». Denmark, 2004.
- [StK94] Strauss Karl «Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, regenerativer und nuklearer Energiequellen». Berlin, 1994.
- [Str07] Streicher Wolfgang «Solarenergie Skript», 2007.
- [Tac97] Tacke Windenergie GmbH: Unterlagen zur Windkraftanlage TW 600. Salzbergen, Tacke, 1997.
- [USD05] US Department of Energy, DOE «Annual Energy Review 2005», Washington, 2005.
- [VAJ08] Vajen K., Jordan U. «Solartechnik». Vorlesung Skript, 2008.
- [VAK08] Vajen K., Jordan U. «Solarthermie». Vorlesung Skript, 2008.
- [VDI03] VDI-6002 «Solar Heating for domestic water», 2003.
- [Wag05] Wagner «Solarwärme optimal nutzen», 2005.
- [Wag09] Wagner a CO «Grid connected solar power system», prices for commercial customers 1/2009
- [Zar08] Zarza Eduardo “Eurosun Conference 2008”, Лиссабон, Португалия