

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Волгоградский государственный технический университет**

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Методические указания к лабораторным работам

Составили А. С. Кудашев, А. В. Ковылин

Волгоград. ВолгГТУ. 2018

**© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Волгоградский государственный
технический университет», 2018**

Альтернативные и возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс] : методические указания к лабораторным работам / сост. А. С. Кудашев, А. В. Ковылин ; М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Волгогр. гос. технич. ун-т. — Электронные текстовые и графические данные (1,25 Мбайт). — Волгоград : ВолгГТУ, 2018. — Учебное электронное издание сетевого распространения. — Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0. Официальный сайт Волгоградского государственного технического университета. Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/> — Загл. с титул. экрана.

Приведены методы расчета электрических и тепловых параметров нетрадиционных источников энергии, даны рекомендации по выбору приборов. Описан порядок расчета лабораторных работ на основе альтернативных источников энергии.

Предназначено для студентов специальности 13.03.01 (бакалавр) «Теплоэнергетика и теплотехника» при изучении дисциплины «Альтернативные и возобновляемые источники энергии».

Лабораторная работа №1. Измерение характеристик солнечных батарей

Цель работы: Ознакомиться с методикой измерения основных параметров солнечных преобразователей прямого действия (ФЭП).

Теоретическая часть

Физические основы вентильного фотоэффекта

В основе вентильного фотоэффекта лежат два фундаментальных явления – внутренний фотоэффект и пространственное разделение разноименных неравновесных носителей заряда.

Внутренний фотоэффект – это явление генерации неравновесных носителей заряда при облучении полупроводника электромагнитным излучением с энергией квантов, достаточной для такой генерации. Другими словами – должно выполняться пороговое условие *красной границы фотоэффекта*, т.е. энергия кванта света должна быть больше некоторой характеристической энергии $\varepsilon_{\text{крас}}$ [1]

$$h\nu \geq \varepsilon_{\text{крас}},$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка.

В случае собственной фотопроводимости эта энергия равна ширине запрещенной зоны ε_g

$$\varepsilon_{\text{крас}} = \varepsilon_g,$$

а в случае примесной – энергии ионизации примесного центра ε_I

$$\varepsilon_{\text{крас}} = \varepsilon_I.$$

Максимальный к.п.д. солнечных батарей возможен только в случае «собственной фотопроводимости», т.е. ситуации, когда при поглощении кванта света происходит переход электрона из валентной зоны в зону проводимости и появляется пара неравновесных носителей заряда – электрон и дырка.

Эти неравновесные носители заряда пространственно не разделены и фотоэдс не возникает, пока электрон и дырка не будут разнесены в пространстве. Эту функцию могут выполнять контакты между полупроводником и металлом (контакт Шоттки) или между полупроводниками (*p-n-переход*, гетероструктура).

Рассмотрим процесс разделения неравновесных носителей заряда на *p-n-переходе*. На рисунке 1 показана типичная конструкция вентильного фотоэлемента с *p-n-переходом (фотодиода)* и включение фотоэлемента во внешнюю цепь.

При контакте материалов с различной величиной работы выхода инжекция электронов всегда происходит из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода. В частности, для полупроводников, отличающихся только типом проводимости, работа выхода из полупроводника

p-типа всегда больше, чем работа выхода из полупроводника n-типа, и при образовании p-n-перехода электроны инжектируются из приконтактного слоя электронного полупроводника в приконтактный слой дырочного полупроводника [3].

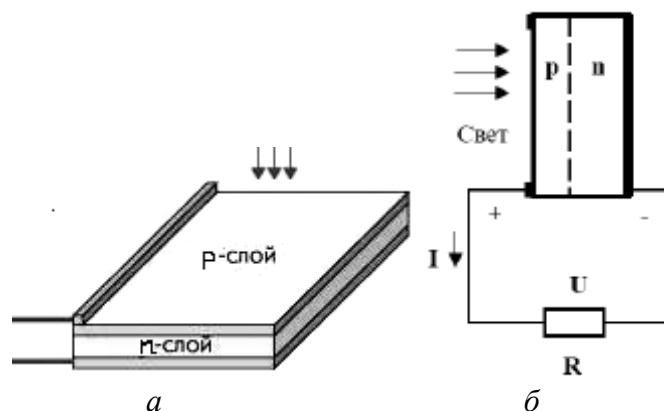


Рис. 1. Фотодиод (вентильный элемент с p-n-переходом) (а) и его включение в режиме солнечной батареи (б) [2]

При этом в n-области создается нескомпенсированный положительный объемный заряд, образованный ионизированными донорными примесями, а в p-области – отрицательный объемный заряд, образованный акцепторами, захватившими инжектированные электроны.

При освещении p-области излучение поглощается в ней и генерирует электронно-дырочные пары. Поскольку концентрация тех и других носителей максимальна у поверхности, они диффундируют вглубь p-области, к p-n-переходу. Электроны (неосновные носители в p-области) перебрасываются контактным полем в n-область, заряжая ее отрицательно. Для основных носителей заряда (в данном случае это дырки) на границе существует потенциальный барьер, который они не способны преодолеть и поэтому дырки остаются в p-области, заряжая ее положительно. Таким образом, электрическое поле контакта пространственно разделяет неравновесные электроны и дырки, образующиеся под действием света.

Попадая в n-область, электроны уменьшают положительный объемный заряд в ней, а дырки, оставшиеся в p-области, уменьшают объемный отрицательный заряд. Это равносильно подаче на p-n-переход прямого смещения φ , понижающего потенциальный барьер на величину $e\varphi$, где e – заряд электрона (рис. 2).

Перемещение электронов через p-n-переход создает фототок – I_ϕ . Поскольку он создается неосновными носителями, ему приписывают отрицательный знак. Понижение барьера ведет к возрастанию тока основных носителей, который в фотоэлементах называется *током утечки*

$$I_y = I_s \exp \frac{e\varphi}{kT},$$

где $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура (К).

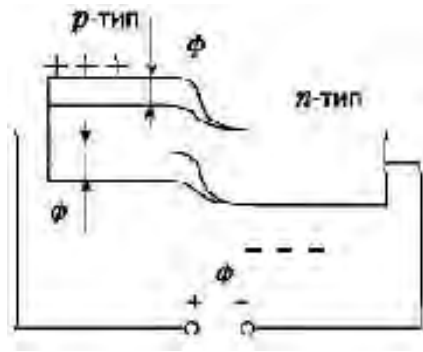


Рис. 2. Освещенный p - n -переход: потенциальный барьер и для электронов, и для дырок уменьшается на величину фотоэдс [2]

Таким образом, через переход протекают следующие токи:

- неосновных носителей: $-I_s$;
- основных носителей: I_y ;
- фототок: $-I_\phi$.

Полный ток через p - n -переход равен

$$I = I_s \left(\exp \frac{e\varphi}{kT} - 1 \right) - I_\phi. \quad (1)$$

Ток неосновных носителей

$$I_s = \left(\frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p n_n}{L_p} \right),$$

где n_p , p_n – концентрация неосновных носителей заряда – соответственно концентрация электронов в зоне проводимости p -области и дырок в валентной зоне n -области; L_n , L_p – диффузионная длина носителей заряда (электронов и дырок соответственно), которая может быть интерпретирована как среднее расстояние, которое проходят неравновесные носители заряда до их рекомбинации с носителями противоположного знака; D_n , D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно.

В первом приближении можно считать фототок пропорциональны освещенности фотоэлемента Φ .

Зависимость фотоэдс вентиляльного фотоэлемента от внешней нагрузки

Уравнение (1) описывает вольт-амперную характеристику идеального фотодиода. По закону Ома ток во внешней цепи (рис. 1, б) равен

$$I = \frac{\varphi}{R}. \quad (2)$$

При разомкнутой внешней цепи, т.е. при $R \rightarrow \infty$, из (1) и (2) получим для фотоэдс «холостого хода»

$$\varphi_{xx} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_\phi}{I_s} + 1 \right). \quad (3)$$

Если же сопротивление нагрузки мало, т.е. $R \rightarrow 0$, то ток короткого замыкания будет равен фототоку $I_{кз} = I_\phi$. Внешний вид вольт-амперной характеристики идеального вентиляльного фотоэлемента приведен на рисунке 3.

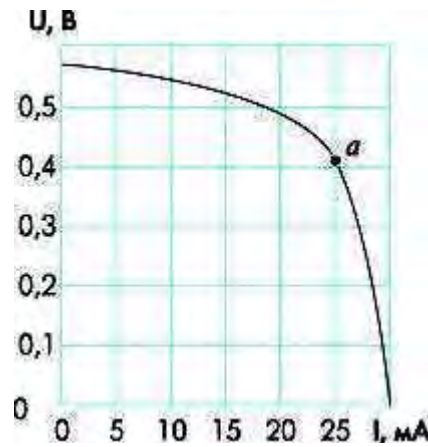


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика кремниевого фотоэлемента. Точка *a* на рис. соответствует работе с оптимальной внешней нагрузкой (с наибольшей мощностью фотоэлектрического генератора) [3]

Согласно формулам (1), (2) и рисунку 3, при увеличении сопротивления нагрузки фотоэдс увеличивается, достигая в пределе значения φ_{xx} , а фототок уменьшается. Мощность, отдаваемая фотоэлектрическим генератором во внешнюю цепь, равна $I_{\phi}\varphi$. При оптимальном выборе сопротивления внешней цепи эта мощность будет максимальной (рис. 3).

Как следует из рисунка 2, максимальная величина фотоэдс не может превышать величину $\varphi_{\max} \approx \varepsilon_g/e$. Фактически, в силу ряда причин, не учтенных нами в первом приближении, максимальная величина фотоэдс будет составлять примерно $\frac{2\varepsilon_g}{3e}$. У фотоэлементов из кремния Si с шириной запрещенной зоны $\varepsilon_g \approx 1$ эВ она будет равна $\varphi_{\max} \approx 600$ мВ, фотоэлементов из германия Ge $\varphi_{\max} \approx 400$ мВ, фотоэлементов из арсенида галлия GaAs $\varphi_{\max} \approx 1$ В.

Для получения больших напряжений фотоэлементы подключают последовательно друг другу, для получения больших токов – параллельно, формируя, таким образом, солнечную батарею с необходимыми параметрами.

Пути и перспективы развития солнечных батарей

Для эффективной работы солнечных элементов (СЭ) необходимо соблюдение ряда условий:

- оптический коэффициент поглощения активного слоя полупроводника должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить поглощение существенной части энергии солнечного света в пределах толщины слоя;
- генерируемые при освещении электроны и дырки должны эффективно собираться на контактных электродах с обеих сторон активного слоя;
- СЭ должен обладать значительной высотой барьера в полупроводниковом переходе;
- полное сопротивление, включенное последовательно с солнечным элементом (исключая сопротивление нагрузки), должно быть малым для того, чтобы уменьшить потери мощности (джоулево тепло) в процессе работы.

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

Аморфный кремний выступил в качестве более дешевой альтернативы монокристаллическому. Первые солнечные элементы на его основе были созданы в 1975 г. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического, поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки a-Si:H толщиной 0,5–1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых подложек толщиной 300 мкм. Кроме того, благодаря существующим технологиям получения тонких пленок аморфного кремния большой площади не требуется операции резки, шлифовки и полировки, необходимых для СЭ на основе монокристаллического кремния. По сравнению с кристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе a-Si:H производят при более низких температурах (300 °С), поэтому можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сокращает расход кремния в 20 раз.

Пока максимальный коэффициент полезного действия экспериментальных элементов на основе a-Si:H составляет 12 %, что несколько ниже, чем для кристаллических кремниевых (≈ 15 %). Однако не исключено, что с развитием технологии к.п.д. элементов на основе a-Si:H достигнет теоретического потолка в 16 %.

Наиболее простые конструкции солнечных элементов из a-Si:H были созданы на основе структуры металл-полупроводник (диод Шоттки) (рис. 4). Несмотря на видимую простоту, их реализация достаточно проблематична – металлический электрод должен быть прозрачным и равномерным по толщине, а все состояния на границе металл/a-Si:H – стабильными во времени. Чаще всего СЭ на основе a-Si:H формируют на ленте из нержавеющей стали или на стеклянных подложках, покрытых проводящим слоем.

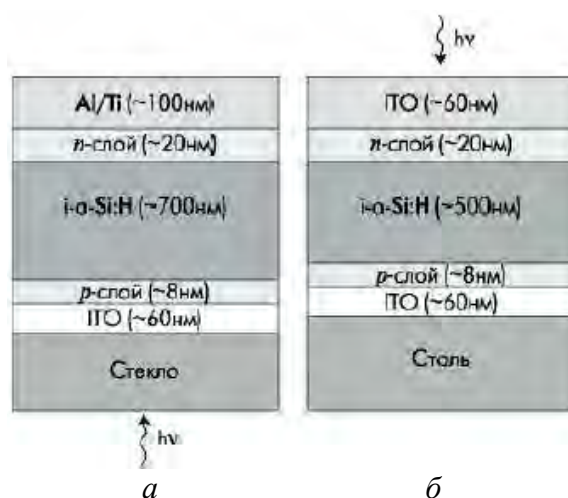


Рис. 4. Солнечные элементы на основе аморфного кремния на стеклянной (а) и стальной (б) подложках [3]

При использовании стеклянных подложек на них наносят прозрачную для света проводящую оксидную пленку из SnO_2 , In_2O_3 или $\text{SnO}_2+\text{In}_2\text{O}_3$ (ITO), что позволяет освещать элемент через стекло.

Дешевизна и простота изготовления солнечных батарей из аморфного кремния сделали эту разновидность СБ наиболее массовой и популярной на рынке. Однако есть области, где основную роль играют другие факторы – высокий коэффициент полезного действия, малые массо-габаритные параметры, устойчивость к жестким внешним воздействиям и т. п. В частности, подобные требования предъявляются к солнечным батареям космических аппаратов. Такие СБ изготавливаются на основе бинарных, тройных и более сложных полупроводниковых соединений, таких, как арсенид галлия GaAs, теллурид кадмия CdTe, диселенид меди-индия CuInSe_2 и др. (рис. 5). На рисунке 6 показаны различные варианты солнечных батарей для космических аппаратов. Видно, что при одинаковой мощности больший к.п.д. и, соответственно, меньшие размеры имеют СБ на основе сложных полупроводниковых соединений.

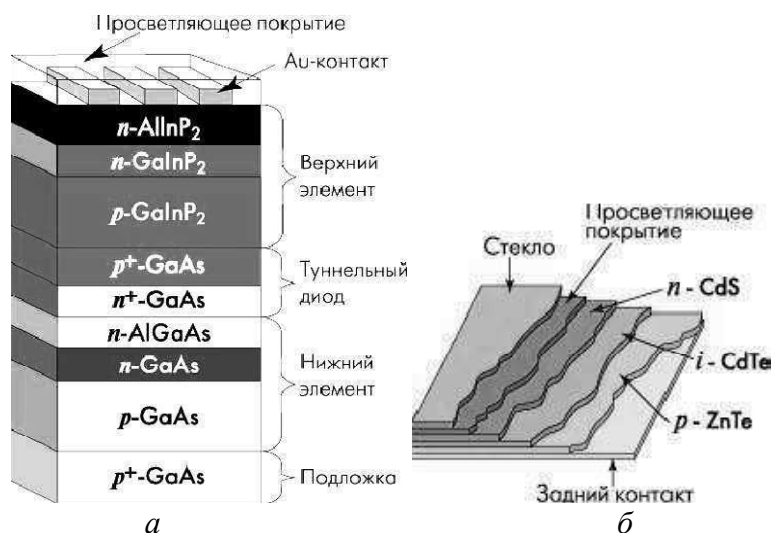


Рис. 5. Солнечные батареи на основе гетероструктур из полупроводников $A^{III}B^V$ (а) и $A^{II}B^{VI}$ (б) [3]

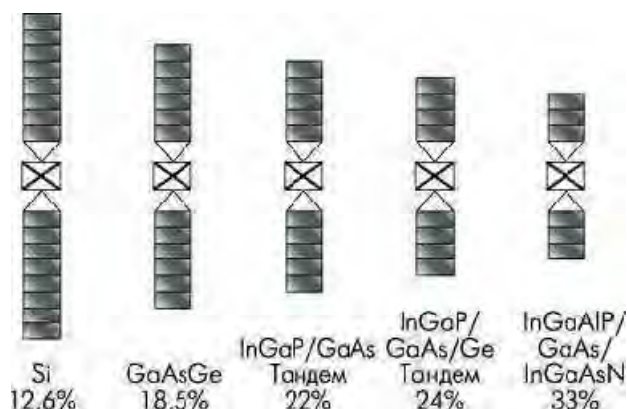


Рис. 6. Сравнительные размеры СБ для космических аппаратов. Цифры внизу – коэффициент полезного действия [2]

Среди СЭ особое место занимают батареи, использующие органические материалы. В частности, к.п.д. солнечных элементов на основе диоксида титана, покрытого органическим красителем, весьма высок и составляет $\approx 11\%$. Немаловажно, что подложками в таких элементах могут выступать полимерные пленки.

Для солнечной батареи на контакте Шоттки используют фталоцианин – органический полупроводник p -типа. В нем наиболее привлекают высокая фотопроводимость в видимой области спектра и термическая стабильность. Фуллерены (C60) также весьма перспективны для органических солнечных батарей на основе гетероструктур C60/ p -Si в связи с их способностью к сильному поглощению в коротковолновой области солнечного спектра.

Практическая часть

Приборы и принадлежности для лабораторной работы: амперметр, вольтметр, солнечная панель, магазин сопротивлений.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Для выполнения лабораторной работы по измерению напряжения холостого хода – U_{xx} и тока короткого замыкания – $I_{кз}$ солнечной батареи собираются схемы представленные на рис. 7

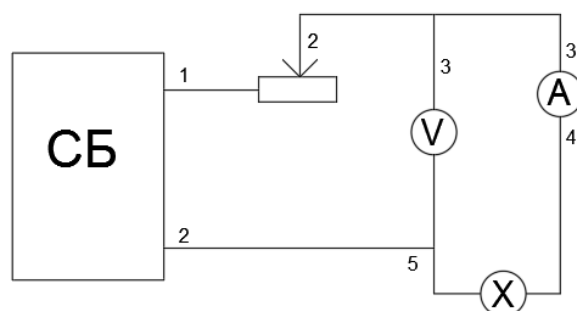


Рис. 7. Схемы измерения напряжения холостого хода - U_{xx} и тока короткого замыкания - $I_{кз}$ солнечной батареи.

Измерения напряжения холостого хода - U_{xx} проводят прямым подключением вольтметра к контактам солнечной батареи.

Измерения тока короткого замыкания - $I_{кз}$ солнечной батареи также проводят прямым подключением, но только амперметра к контактам солнечной батареи.

Задание 2. Исследуем работу солнечной батареи иод нагрузкой (изменяя сопротивление). $I, U=f(R)$. Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) производится по электрической схеме (рис. 8) с помощью вольтметра и амперметра.

Ток и напряжение на солнечной батарее изменяются с помощью магазина сопротивления.

Используя магазин сопротивления разнономинала замеряем ток и напряжение, вырабатываемые солнечной батареей (СБ). Расстояние электрических лампочек до поверхности СБ должно быть постоянным.

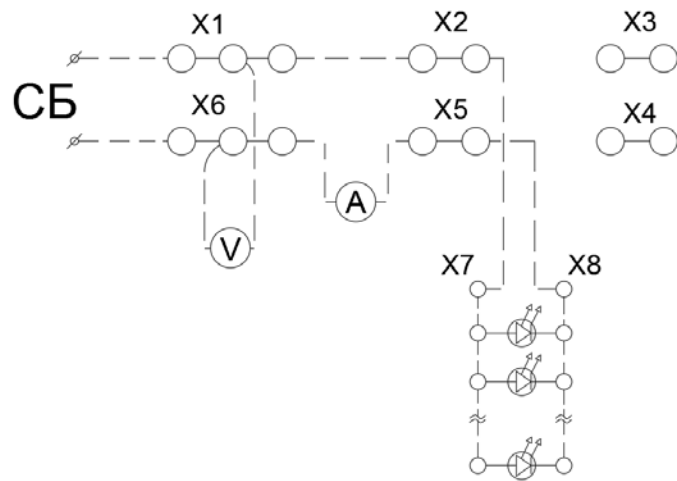


Рис. 8. Монтажная схема

Результаты полученных измерений заносятся в лабораторный журнал в виде таблицы 1:

Таблица 1

Напряжение, вырабатываемое солнечной батареей при разной нагрузке

Сопротивление нагрузки R, Ом	Сила тока I, мА	Напряжение U, В	Мощность P, Вт

По результатам полученных измерений в таблицы 1 построить вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФЭП рис.9.

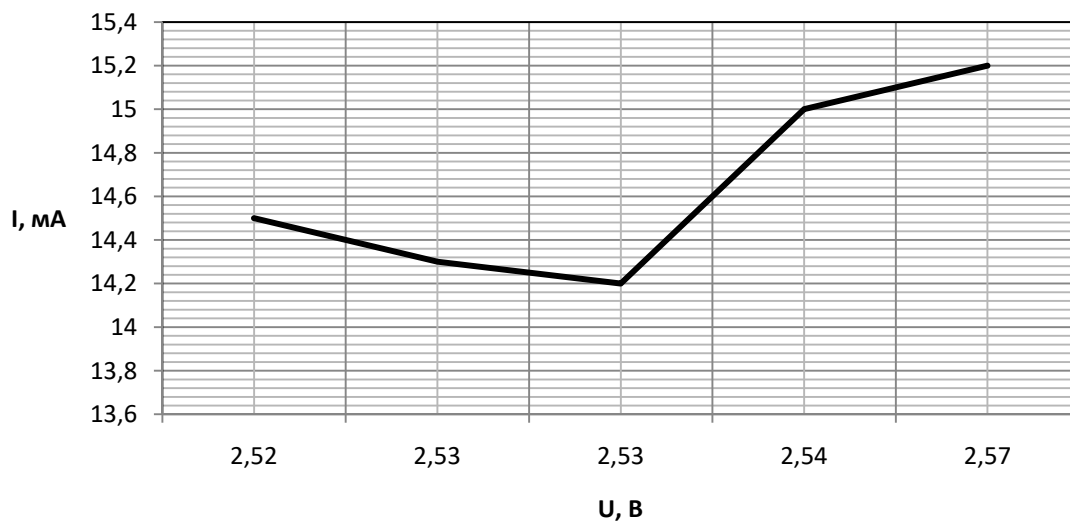


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи

Задание 3. Расчет удельной мощности солнечной батареи.

По результатам полученных измерений в таблицы 1 в соответствии с формулой:

$$W = \frac{P_{эф}}{S}, \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$$

рассчитать удельную мощность вырабатываемую ФЭП.

Площадь поверхности солнечной батареи $S = 0,0132 \text{ м}^2$.

Сделать вывод о наиболее эффективном режиме работы ФЭП.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение солнечной батареи.
2. На каких структурах возможно наблюдение вентильного фотоэффекта?
3. Поясните, в чем состоит явление внутреннего фотоэффекта.
4. Что такое собственная фотопроводимость?
5. Чем определяется направление инжекции электронов при контакте двух материалов?
6. Из каких составляющих складывается полный ток, протекающий через *p-n*-переход?
7. Используя формулу для полного тока через *p-n*-переход и закон Ома для внешней цепи, получите формулу фотоэдс вентильного фотоэлемента.
8. Что такое фотоэдс «холостого хода»?
9. Покажите на графике вольт-амперной характеристики фотоэлемента точку, соответствующую максимальной мощности, отдаваемой фотоэлектрическим генератором во внешнюю цепь.
10. Назовите основные факторы, определяющие эффективность работы солнечных батарей.

Лабораторная работа №2. Измерение основных параметров теплового насоса

Цель работы: определение отопительного коэффициента теплового насоса при различных режимах его работы в автономной системе отопления.

Теоретическая часть

В промышленности сбрасывается в окружающую среду огромное количество низкопотенциальной теплоты, которую уже невозможно использовать в традиционных технологических процессах и быту. Эти тепловые ресурсы называются *вторичными (побочными) энергоресурсами (ВЭР)*. К ним относится теплота с потенциалом выше температуры окружающей среды (от 20°С и выше). Эта теплота получается после промышленных технологий и после утилизации вызывает *тепловое загрязнение* природы, способствующее парниковому эффекту и мировому потеплению климата.

Эффективным способом в устранении этого явления служит применение так называемого *теплового насоса*. Основной задачей, решаемой с помощью теплового насоса, является не только использование ВЭР, но и бесплатную энергию окружающей среды.

Тепловой насос представляет собой обычную холодильную установку.

В 1824 г. Карно впервые использовал термодинамический цикл для описания процесса, и этот цикл остается фундаментальной основой для сравнения с ним и оценки эффективности тепловых насосов.

Тепловой насос можно рассматривать как обращенную тепловую машину. Тепловая машина получает тепло от высокотемпературного источника и сбрасывает его при низкой температуре, отдавая полезную работу. Тепловой насос требует затраты работы для получения тепла при низкой температуре и отдачи его при более высокой.

Можно легко показать, что если обе эти машины обратимы (т. е. термодинамические процессы не содержат потерь тепла или работы), то существует конечный предел эффективности каждой из них, и в обоих случаях это есть отношение Q_h/W . Если бы это было не так, то можно было бы построить вечный двигатель, просто соединив одну машину с другой. Это отношение очень важно. В случае тепловой машины оно записывается в виде W/Q_h и называется термическим КПД, а для теплового насоса оно остается в виде Q_h/W и называется коэффициентом преобразования (КОП). Его следует отличать от аналогичного отношения Q_l/W применяемого в холодильной технике и называемого в дальнейшем $КОП_{охл}$. Поскольку $Q_h = W + Q_l$, получается $КОП_{охл} = КОП - 1$.

Цикл Карно - рабочий процесс идеальной тепловой машины, работающей в заданном интервале температур. Тепло изотермически подводится при температуре T_l и изотермически отводится при температуре T_h . Сжатие и расширение производятся при постоянной энтропии, а работа подводится от внешнего двигателя. Используя определение энтропии и законы термодинамики, можно показать, что коэффициент преобразования для цикла Карно имеет вид

$$\text{КОП} = T_1 / (T_H - T_1) + 1 = T_H / (T_H - T_1).$$

Никакой тепловой насос, созданный в пределах нашей Вселенной, не может иметь лучшей характеристики, и все практические циклы реализуют стремление максимально приблизиться к этому пределу.

С целью приближения к простому циклу Карно, а фактически это значит — с целью создания практически полезного теплового насоса, необходимо стремиться к подводу тепла при условиях, близких к изотермическим. Для этого подбираются рабочие тела, изменяющие агрегатное состояние при необходимых температурах и давлениях. Они поглощают тепло при испарении и отдают при конденсации. Эти процессы образуют изотермы цикла. Сжатие пара, как правило, требует, чтобы пар был сухим, что вызвано особенностями механики большинства компрессоров. Попадание жидкости вместе с паром на вход компрессора может повредить его клапаны, а поступление большого количества жидкости в компрессор может вообще вывести его из строя (если не приняты предохранительные меры, например подпружиненная головка цилиндра).

Цикл с механической компрессией пара и его изображение на T — S (температура — энтропия) диаграмме показаны на рис.

Рассмотрим цикл только с сухой компрессией пара и расширением в дроссельном клапане. Этот клапан представляет собой либо регулируемое сопло или отверстие, либо капиллярную трубку. Выбор между ними определяется требованиями в регулировании. Отсутствие расширительной машины в цикле означает, что некоторое количество полезной работы теряется и КОП уменьшается. Как правило, это оправдано тем, что стоимость расширительной машины не окупается полученной по ней работой. Процесс расширения в сопле необратим, он показан пунктиром на T — S диаграмме (рис.1). Обычно он рассматривается как адиабатический, т. е. проходящий без подвода или отвода тепла при расширении рабочего тела.

Теперь продемонстрируем цикл другим способом, с помощью широко применяемой на практике для парокompрессионных циклов диаграммы давление — удельная энтальпия (p — h), что показано на рис. 1

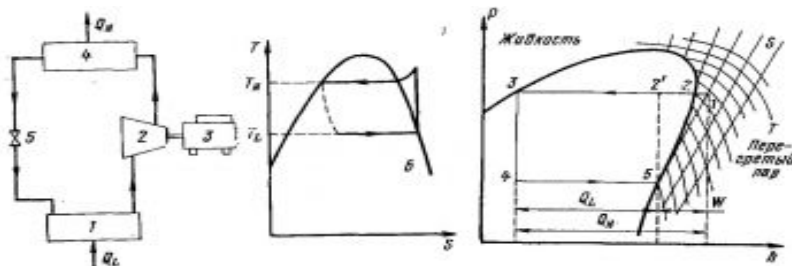


Рис. 1. Схема работы тепловой машины

Этот рисунок следует рассмотреть внимательно. Сжатое рабочее тело под высоким давлением покидает компрессор в точке 1. Поскольку на вход в компрессор поступал только сухой пар и благодаря наклону линий постоян-

ной энтропии, в точке 1 пар перегрет. Прежде чем пар начнет конденсироваться в точке 2, его следует охладить при постоянном давлении. Между точками 2 и 3 происходит конденсация при постоянной температуре (если нет утечек пара). Отсюда видно, что теплообменный аппарат, в котором происходит конденсация (конденсатор), всегда должен быть рассчитан на прием перегретого пара. Адиабатическое расширение изображается на p — h диаграмме вертикальной прямой 3—4, и в этом одна из причин удобства такой диаграммы. Для расчета цикла необходимо знать состояния рабочего тела только на входе в компрессор и выходе из него. Остальное изображается прямыми линиями. Испарение происходит при постоянных давлении и температуре между точками 4 и 5. Следует отметить, что расширение происходит фактически в смеси жидкости и пара. Входящая в испаритель смесь содержит значительную долю пара, иногда до 50% по массе, и эта доля рабочего тела, естественно, уже не участвует в процессе испарения и поглощения тепла. Между точками 5 и 1 происходит изоэнтропийное сжатие сухого пара. На практике его реализовать нельзя, но здесь мы рассматриваем идеализированный цикл. Его эффективность меньше, чем у цикла Карно, из-за необратимости процесса расширения.

Подчеркнем второе важное преимущество p — h диаграммы. Поскольку на горизонтальной оси откладывается энтальпия, она допускает прямой отсчет Q_h , Q_L и W . Простое соотношение $Q_h = Q_L + W$ из диаграммы очевидно. В то же время диаграмма позволяет сразу оценить значение КОП. Для получения высокого КОП значение Q_h должно быть велико, а W (работа сжатия) должна быть мала. Пригодность того или иного рабочего тела можно быстро оценить при взгляде на его p — h диаграмму.

Описанный парокompрессионный цикл одинаков для теплового насоса и для холодильной машины. Его часто называют обратным циклом Ренкина или, менее точно, просто циклом Ренкина. В действительности цикл Ренкина относится к процессу в паровых турбинах при выработке электроэнергии. На T — S диаграмме он протекает по часовой стрелке, включая испарение и конденсацию. Подчеркнем два различия между циклом Ренкина и механическим парокompрессионным. Первое состоит в направлении: цикл Ренкина— это энергетический цикл, отдающий мощность при расширении пара в турбине. Второе различие в том, что в цикле Ренкина сжимается 100% жидкости. Действительно, обратимым по отношению к циклу Ренкина был бы цикл с расширительной машиной, а не с необратимым расширением в дросселе. На практике, однако, разница не очень существенна.

Большие перспективы в качестве источников холода и теплоты низкого и даже среднего (до 300 °С) потенциала имеют тепловые насосы. Основным элементом теплонасосной установки является компрессор или абсорбционная машина (рис. 2).

На рисунке приведена схема теплового насоса для отопления здания. Элементы схемы: компрессор K , конденсатор $KД$, регулирующийся вентиль $PВ$ и испаритель I составляют обычную компрессионную холодильную установку.

Испарение холодильного агента в испарителе происходит за счет теплоты, получаемой от холодной воды, и энергии, подводимой к компрессору.

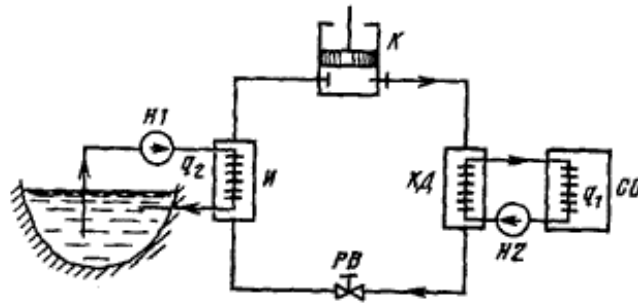


Рис. 2. Схема теплового насоса для отопления здания

Насосом $H1$ вода, служащая источником низко потенциальной теплоты, подается в испаритель. В конденсаторе холодильный агент отдает часть своей теплоты воде из системы отопления CO . Циркуляция подогретой воды осуществляется насосом $H2$. Промышленностью выпускается тепловой насос НТ-80предназначенный для теплохладоснабжения различных объектов. В режиме теплоснабжения насос обеспечивает получение горячей воды с температурой 45—48 °С при температуре низкопотенциального теплоносителя не ниже 6 °С; в режиме хладоснабжения — получение холода с температурой до —25 °С при охлаждении конденсатора водой с температурой не выше 30 °С. В качестве источника низкопотенциальной теплоты в тепловом насосе используют водопроводную, артезианскую и термальную воду с температурой от 10 до 40 °С. Хладагентом в установке является хладон Ф-12.

$$l_u = q_1 - q_2,$$

$$\mu = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{q_1}{l_u}, \quad (1)$$

μ - отопительный коэффициент

$$q_2 = T_1(s_1 - s_4), \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где s_1 - энтропия хладагента в точке 1, кДж/(кг·К); s_4 - энтропия хладагента в точке 4, кДж/(кг·К)

$$q_1 = T_2(s_2 - s_3), \text{ кДж/кг}, \quad (3)$$

где s_2 - энтропия хладагента в точке 2, кДж/(кг·К); s_3 - энтропия хладагента в точке 3, кДж/(кг·К)

$$\mu = \frac{q_1}{l_u} = \frac{T_2(s_2 - s_3)}{T_2(s_2 - s_3) - T_1(s_1 - s_4)},$$

$$s_2 - s_3 = s_1 - s_4,$$

$$\mu = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_2}}, \quad (4)$$

$$q_1 = q_2 - l_u,$$

$$q_1 = h_2 - h_4,$$

$$q_2 = h_1 - h_5,$$

$$h_4 = h_5,$$

$$l_u = q_1 - q_2 = (h_2 - h_4) - (h_1 - h_5) = h_2 - h_1,$$

$$\mu = \frac{q_1}{l_u} = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_1}.$$

Запишем формулу (1) через величины, измеряемые в данной лабораторной работе. Имеем

$$Q_1 = G_1 c_{p1} (T_1 - T_3), \text{ Дж}, \quad (5)$$

где Q_1 – количество теплоты, переданное водой радиатору от фреона, Дж; G_1 – массовый расход фреона, кг/с; c_{p1} – удельная изобарная теплоемкость фреона, Дж/(кг·К).

Количество теплоты Q_2 , отданное водой в испарителе

$$Q_2 = m_e c_{p2} (T_{ex} - T_{вых}), \text{ Дж}, \quad (6)$$

где m_e – масса воды, кг; c_{p2} – удельная изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); T_{ex} – начальная температура воды °С; $T_{вых}$ – конечная температура воды °С;

Так, для выбранного режима работы вентилятора и температуры нагрева воды в системе отопления необходимо определить разность показаний электросчетчика между конечными SW_K и начальными SW_H показаниями:

$$SW = SW_K - SW_H, \text{ Вт}\cdot\text{ч}.$$

Разделив эту разность на время t , с, получим величину

$$L_u = \frac{SW}{t}, \text{ Вт}, \quad (7)$$

Определяем мощность теплоносителя

$$W_{менл.} = \frac{Q_2}{t}, \text{ Вт}. \quad (8)$$

С учетом (7), (8) и (1) определим отопительный коэффициент μ теплового насоса:

$$\mu = \frac{W_{менл.}}{L_u}.$$

Затем выполним аналогичные расчеты для других режимов работы вентилятора и температуры нагрева воды в системе отопления.

Для сравнения необходимо сделать расчет отопительного коэффициента для обратного цикла Карно (4), принимая

$$T_1 = \frac{T_{ex} - T_{вых}}{2} \text{ и } T_2 = \frac{T_1 - T_3}{2}.$$

В заключение сравнить величины отопительных коэффициентов для реального и идеального тепловых насосов.

Практическая часть

Описание лабораторной установки

Тепловой насос – это установка, предназначенная для передачи теплоты от источника с низкой температурой к нагреваемому теплоносителю с более высокой температурой.

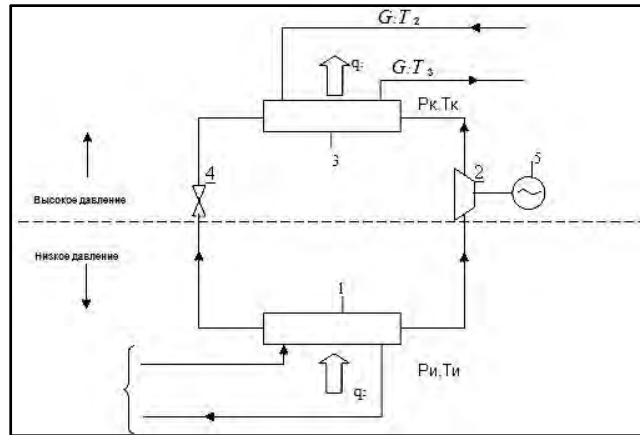


Рис. 3. Схема теплового насоса. 1 - Испаритель; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – дроссельный вентиль; 5 – электродвигатель

Порядок выполнения работы

1. Включить холодильник, дождаться пока температура внутри теплоносителя установится.
2. В цепь компрессора подключаем счетчик эл. энергии, чтобы измерить потраченную эл. энергию.
3. Помещаем емкость с известным объемом воды внутрь камеры холодильника.
4. Проводим измерения температуры нагревателя и воды с помощью установленной термопары через 12 минут в течении 60 минут.
5. Результаты измерений записываем в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты измерений

t, мин	t _{нагревателя} , °C	t _{воды} , °C	t, мин	t _{нагревателя} , °C	t _{воды} , °C
0			36		
12			48		
24			60		

Вопросы для самоконтроля

1. Определение теплового насоса?
2. Схема теплового насоса?
3. Что такое отопительный коэффициент?
4. КПД теплового цикла Карно?
5. Схемы работы парокомпрессионных циклов?

Лабораторная работа №3. «Ветрогенератор постоянного тока»

Цель работы: Ознакомиться с методикой измерения основных параметров ветрогенератора постоянного тока.

Теоретическая часть

Генератор постоянного тока – это устройство, которое преобразует механическую энергию в электрическую для дальнейшего использования во внешнем контуре. Источником механической энергии в таком случае может служить любое механическое усилие: вращение специальной ручки, подключение двигателя к прибору. Нужно отметить, что подавляющая часть квартир и домов в черте любого города снабжается при помощи именно таких генераторов, только промышленного типа.

Электрический генератор тока может действовать полностью противоположно. Обратное преобразование электрической энергии в механическую осуществляется посредством электродвигателя. Многие моторы оснащаются ручным (механическим) приводом, которые при правильном подключении могут преобразовать энергию и сети в обратном направлении.

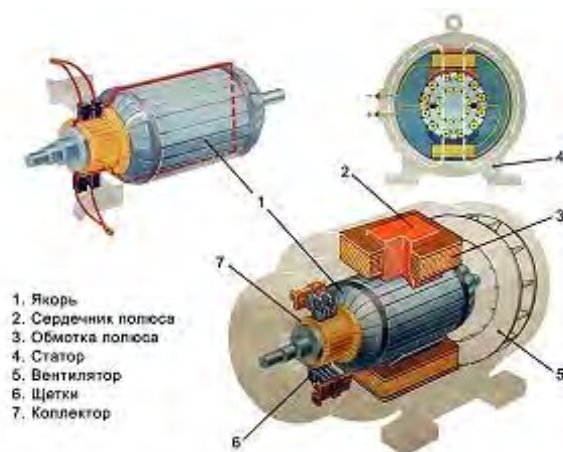


Рис . 1. Схема генератора постоянного тока

Принцип работы и устройство. Генератор постоянного тока состоит из двух основных частей – это статор и ротор. Корпус: внешняя рама генератора. Зачастую изготовлен из чугуна или стали. Корпус обеспечивает механическую прочность для всей конструкции генератора (или электродвигателя). Он также передает магнитный поток, создаваемый полюсами;

Магнитные полюсы. Соединяются с корпусом при помощи винтов или болтов, на них размещается обмотка;

Статор, остов или ярмо изготавливается из ферромагнитных сплавов, на эту деталь устанавливается катушка возбуждения. Сердечники оснащены полюсами, которые помогают определить направление потока заряженных частиц. Именно магнитные наконечники образуют магнитное поле, необходимое для работы устройства;

Ротор: якорь генератора. Сердечник собирается из отдельных стальных пластин, это помогает увеличить КПД генератора и уменьшить образование вихревых токов. При установке пластин образуются впадины, в которые наматывается обмотка якоря или обмотка самовозбуждения; Коммутатор и щетки. Щетки изготавливаются из графита, при этом их в генераторе как минимум две. Узнать число щеток можно при помощи подсчета полюсов – этот показатель идентичен.

Практическая часть

Приборы и принадлежности: ветрогенератор, вентилятор, мультиметр, ваттметр, анемометр.

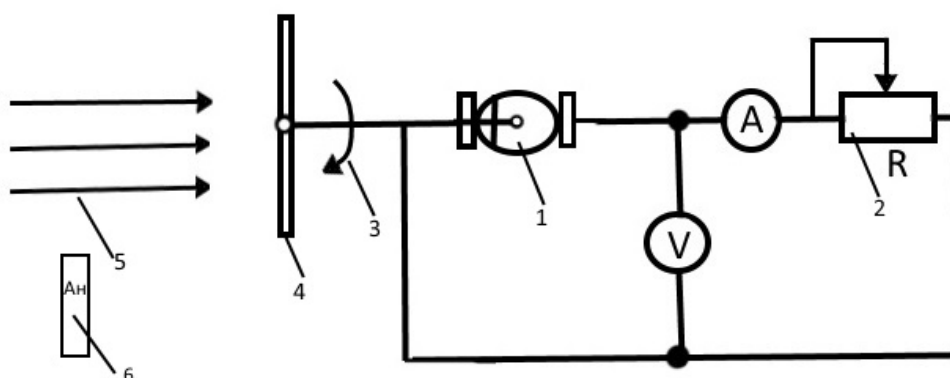


Рис. 2. Схема лабораторной установки. 1- генератор постоянного тока; 2- магазин сопротивлений; 3 – направление вращения; 4 – лопасти ветрогенератора; 5- поток воздуха; 6- анемометр (ветромер).

Порядок выполнения работы

Задание 1

1. Подсоединить генератор постоянного тока как показано на рис. 2.
2. Включить напольный вентилятор в положении 1, установить крыльчатку генератора на фиксированное расстояние от вентилятора, так чтобы наблюдалось ее равномерное вращение.
3. Не меняя сопротивление, измерить с помощью анемометра скорость воздушного потока на уровне крыльчатки. Результаты измерения занести в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты измерений задания 1

Режим работы, V	v, м/с	U, В	I, А	P, Вт

4. Повторить пп 2-4, для двух оставшихся режимов работы напольного вентилятора. Результаты измерения занести в таблицу 1.

Задание 2

1. Включить напольный вентилятор в положении 3, установить крыльчатку генератора на фиксированное расстояние от вентилятора, так чтобы наблюдалось ее равномерное вращение.

2. Замерить скорость воздушного потока, расстояние между вентилятором и ветрогенератором.

3. С помощью магазина сопротивлений установить значение максимального сопротивления, при котором наблюдается устойчивое вращение ветрогенератора, Измерить величину тока, напряжения и сопротивления. Результаты измерения занести в таблицу 2

4. Выполнить п. 3, как минимум для пяти различных значений сопротивлений меньшего номинала.

Таблица 2

Результаты измерений задания 2

R, Ом	U, В	I, А	P, Вт	L, м

Вопросы для самоконтроля

1. Основные типы ветрогенераторов?
2. Схема генератора постоянного тока?
3. Схема генератора переменного тока?
4. Принципиальные схемы включения ветрогенераторов для электроснабжения потребителей?
5. Особенности работы ветрогенератора с сетью?

Лабораторная работа № 4.

Изучение основных процессов распространения солнечной энергии

Цель работы: познакомить студентов с процессами распространения солнечной энергии. Изучить схему прохождения солнечных лучей через атмосферу Земли.

Теоретическая часть

1. Интенсивность солнечного излучения на поверхности земли.

Солнечное излучение, распространяясь со скоростью 30000 км/с, через 8 мин достигает орбиты Земли, отстоящей от Солнца на $150 \cdot 10^6$ км. Его исходная интенсивность настолько велика, что даже на таком расстоянии она составляет около 1300 Вт/м^2 . Хотя Земле достается лишь малая доля солнечной энергии, но и ее достаточно, чтобы в десятки раз перекрыть существующую потребность в энергии всего земного шара.

На поверхность Земли попадает лишь 50% радиации Солнца, остальная часть поглощается облаками и самой поверхностью Земли (рис. 1) [11].

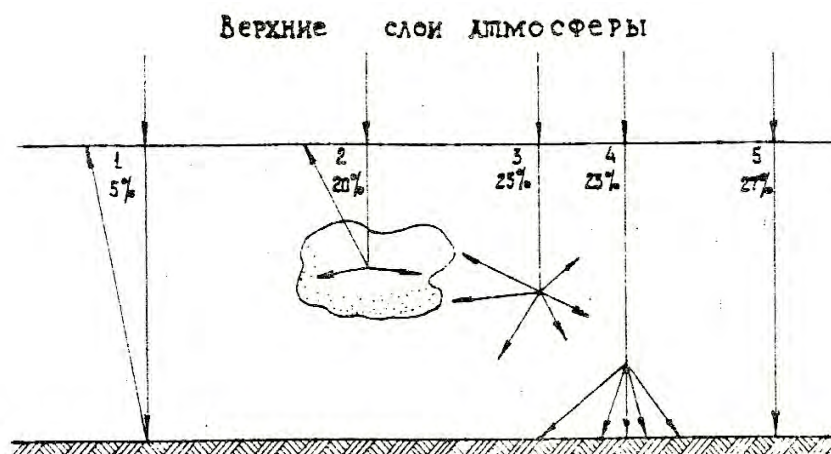


Рис. 1. Прохождение солнечных лучей через атмосферу Земли: 1 – отражение от поверхности Земли; 2 – отражение облаками; 3 – поглощение самой атмосферой; 4 – рассеивание атмосферой с достижением земной поверхности; 5 – доля излучения, достигающая поверхности Земли

В среднем годовое количество солнечной радиации, поступающей на поверхность Земли, составляет $2000\text{--}2500 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$ в зонах пустынь и $1000\text{--}1500 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$ – в районах высоких широт. Необходимо отметить, что солнечная радиация распределяется по поверхности Земли гораздо равномернее, чем другие источники. По сравнению с традиционными источниками, солнечная энергия обладает малой плотностью и поэтому ее необходимо концентрировать для функционирования современных энергетических и технологических систем с помощью гелиоконцентраторов. Интенсивность зависит от двух факторов: угла наклона лучей к плоскости поверхности в данной точке и длины пути лучей в атмосфере. Оба этих фактора зависят от высоты Солнца h . Интенсивность облучения определяется выражением:

$$E = J \cdot \cos i,$$

где J – интенсивность излучения, падающего на горизонтальную поверхность; i – угол наклона луча к нормали поверхности.

В действительности полная энергия падающего излучения превышает прямую составляющую, так как присутствует еще и рассеянная (диффузная) составляющая, в которую входит излучение, рассеянное различными компонентами атмосферы. Рассеянное излучение составляет значительную долю полной энергии (при низких высотах солнца она может достигать половины ее) (табл. 1).

Таблица 1

Отношение процента месячных сумм прямой и рассеянной радиаций к суммарной для г. Волгоград

Вид радиации	Месяц года												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Прямая	3	2	5	3	1	2	3	3	0	3	2	7	
Рассеянная	7	8	5	7	9	8	7	7	0	7	8	3	

Энергетический спектр рассеянной составляющей излучения несколько сдвинут в сторону более коротких волн по сравнению со спектром прямой составляющей, поскольку именно в области коротких волн рассеяние излучения в атмосфере максимально [12].

Обоснование использования солнечной радиации оценивается общей энергией, получаемой на поверхности земли в данное время дня и года. При этом учитывается вклад рассеянной компоненты излучения в общем объеме энергии. Интенсивность прямой составляющей рассчитывается с учетом временных колебаний воздушной массы и изменения пути лучей в атмосфере. Точность такого расчета зависит от состояния атмосферы (ее загрязнения, тумана, облачности и т.д.). Эти явления уменьшают прямую составляющую, однако рассеянная компонента может значительно возрасти. При плотной облачности до Земли доходит лишь рассеянная компонента.

Наилучшим методом оценки мощности солнечной радиации является непосредственное долговременное измерение ее интенсивности в различных зонах земного шара. В настоящее время существует несколько метеорологических станций, на которых непрерывно регистрируют инсоляцию. Однако ориентировочные расчеты можно произвести для горизонтальной поверхности в любой точке земного шара. Для любого времени суток, заданного углом τ из уравнения (1), можно получить высоту Солнца h [13].

$$\sin h = \cos \varphi \cdot \cos \tau + \cos \varphi \cdot \cos \delta, \quad (1)$$

где h – высота Солнца; φ – широта, соответствующая расчетной точке; τ – угол, характеризующий угловые перемещения Солнца вокруг оси с широтой φ в зависимости от времени после полудня.

$$\tau = \frac{t}{24} \cdot 2\pi = 0,252 t \text{ рад} = \frac{t}{24} \cdot 360^\circ = 15t \text{ град},$$

δ – сезонное изменение кажущегося положения Солнца(угол склонения). Он изменяется от $+23,5^\circ$ в летнее солнцестояние до $(- 23,5^\circ)$ в зимнее солнцестояние. Для других времен года эту величину нужно брать из таблиц. Ее также можно найти из соотношения:

$$\delta = 23,5 \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \text{ град,}$$

δ – изменяет свой знак в соответствии со знаком функции; d – число дней, прошедших с момента весеннего равноденствия.

Интенсивность прямого излучения J определяется исходя из величины воздушной массы, единице которой соответствует путь, пройденный лучами при вертикальном падении. Тогда для любой высоты Солнца h воздушная масса равна $M=I/\sin h$. Интенсивность для любой данной поверхности равна $E=J \cdot \sin h$. Результаты вычислений инсоляции для различных широт при чистой атмосфере сведены в таблице 2.

Таблица 2

Инсоляции для различных широт при чистой атмосфере

Местоположение	Широта	Инсоляция, кВт·ч/м ²		
		Наибольшее значение за день	Наименьшее значение за день	Годовое значение
Экватор	0	6,5(7,5)	5,8(7,8)	2200(2300)
Тропики	28,5	7,1(8,3)	3,4(4,2)	1900(2300)
Средние широты	45	7,2(8,5)	1,2(1,7)	1500(1900)
Центральная Англия	52	7,0(8,4)	0,5(0,8)	1500(1700)
Полярный круг	66,5	6,5(7,9)	0(0)	1200(1400)

Первое значение соответствует прямой составляющей излучения, второе(в скобках) учитывает вклад рассеянной энергии[14]. При восходе и заходе Солнца $h=0$. На экваторе интенсивность солнечного излучения достигает максимума при равноденствии, когда азимут Солнца в течение всего дня равен 90° – оно, как бы висит над головой. В период летнего и зимнего солнцестояния интенсивность солнечного излучения на экваторе минимальна. Летнее солнцестояние 22 июня, зимнее – 22 декабря. Моменты равноденствия 21 марта и 23 сентября(день равен ночи). Общее количество солнечного излучения за год определяют путем суммирования суточных данных. Изменение солнечной радиации в течение года описывается кривой, по форме близкой к синусоиде, максимум и минимум которой распределены симметрично в двух полугодиях. Из таблицы 2 видно, что дневное количество солнечного излучения максимально не на экваторе, а вблизи широты 40° . Это следствие наклона земной оси к плоскости ее орбиты.

Интенсивность солнечного излучения в зимнее время с повышением широты резко падает, поэтому полное его количество за год в районе полярного круга составляет лишь половину его значения на экваторе. В таблице пред-

ставлены данные для чистой атмосферы. С учетом облачности и загрязнений атмосферы промышленными отходами приведенные данные следует уменьшить, по крайней мере, вдвое.

2. Собираение солнечной энергии.

Рассмотрим тело, освещаемое Солнцем. При конвективном теплообмене (естественная конвекция) воздух нагревается от тела и поднимается вверх, забирая тепло. При неподвижном воздухе интенсивность конвективного потока составляет $\alpha=4 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, а при движении воздуха резко возрастает и составляет $\alpha=30 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, если скорость ветра около 10 м/с.

Другим важным фактором, влияющим на собиание солнечной энергии, является длинноволновое излучение, приходящее из атмосферы. Оно испускается главным образом молекулами углекислого газа (CO_2) и водяного пара при поглощении ими прямого солнечного излучения, а также излучения, отраженного от Земли и обусловленного конвекцией. Общая интенсивность этого излучения зависит от содержания в атмосфере водяного пара, особенно вблизи земной поверхности [15]. При повышении влажности и сплошной облачности атмосфера ведет себя как черное тело с температурой около 280 К (7°C); соответствующая интенсивность излучения на горизонтальной поверхности составляет около 300 Вт/м^2 . Но тем не менее общая интенсивность атмосферного излучения не падает ниже 100 Вт/м^2 , благодаря чему ночью на поверхности Земли температура остается вполне приемлемой. В отсутствие подобного излучения температура земной поверхности в ночные часы должна резко падать (вследствие излучения энергии в пространство), как на Луне, где атмосфера отсутствует ($+120, -120$). Температура поверхности Земли в течение ночи иногда снижается настолько, что появляется иней, но, за исключением полярных районов, она редко опускается ниже 0°C .

Практическая часть

1. Изучить способ нахождения интенсивности солнечного излучения.
2. Познакомиться со схемой прохождения солнечных лучей через атмосферу Земли.
3. Изучить принципы собиания солнечной энергии.
4. Составить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение интенсивности облучения.
2. Дайте определение интенсивности прямого излучения.
3. Дайте обоснование использования солнечной радиации.
4. Дайте определение собианию солнечной энергии.

Лабораторная работа № 5. **Плоские солнечные коллекторы**

Цель работы: познакомить студентов с работой плоского солнечного коллектора. Изучить различные схемы солнечных коллекторов.

Теоретическая часть

Одной из разновидностей гелиоприемника является плоский солнечный коллектор. Он представляет собой тонкую пластину, лежащую на теплоизолирующем основании. Получая энергию от Солнца, такое устройство вновь излучает ее, не обмениваясь излучением с окружающей средой. Такая конструкция является самой простой и дешевой[16].

Характеристики плоского коллектора можно улучшить, если, не ухудшая существенно его поглотительной способности A во всем спектре солнечного излучения, увеличить соотношение A_c/ξ в длинноволновой части спектра (A_c – поглотительная способность пластины для данного вида радиации, ξ – излучательная способность пластины при низких температурах). Этого можно добиться с помощью селективных поглотителей. Обычно он представляет полированную металлическую поверхность, покрытую тонкой, темного цвета, защитной пленкой окисей никеля или меди. Его поглотительная способность в коротковолновой области довольно высока, порядка 0,9. При очень тонком покрытии подобный поглотитель прозрачен для излучения с длиной волны превышающей его толщину. Тогда излучательная способность его в длинноволновой части спектра должна быть не выше, чем у металла, то есть около 0,1. Равновесная температура такого селективного поглотителя с величиной отношения A_c/ξ , близкой к 9, должна повыситься до 427 К или 154°C, если интенсивность длинноволнового атмосферного излучения составляет 200 Вт/м², а поглотительная способность к этому виду излучения равна 0,1. Однако вся трудность заключается в том, что большинство селективных покрытий очень чувствительно к пылевому загрязнению, и в естественных условиях их характеристики быстро ухудшаются[17].

Одним из наиболее эффективных методов усовершенствования солнечных коллекторов является наложение на поверхность поглотителя одного или нескольких прозрачных покрытий(рис. 1). Большинство тонких пленок из стекла и чистых пластмасс пропускает около 90% солнечного излучения, причем на долю излучения с длинами волн более 2мкм приходится менее 10%. Такие характеристики стекла позволяют усилить «тепличный эффект»: стекло, покрывающее теплицу, хорошо пропускает солнечное излучение, но поглощает длинноволновое излучение, испускаемое внутренними поверхностями теплицы. В результате потери на конвекцию снижаются до минимума. Интенсивность тепловых потерь на расстоянии в несколько сантиметров составляет в таких поглотителях около 4 Вт/м²·К между пластинами поглотителя и покрытия, которая теперь значительно меньше, чем в случае непосредственного контакта поглотителя с воздухом, благодаря чему потери

уменьшаются. Между пластинами осуществляется также радиационный обмен энергией, который благоприятнее обмена с атмосферой. Таким образом конвективный теплообмен между поглотителем и покрытием, вызывающий дополнительную передачу энергии, приводит к увеличению интенсивности теплообмена почти вдвое [18].

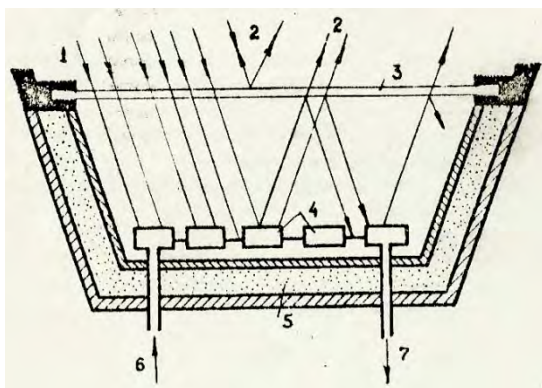


Рис. 1. Плоский солнечный коллектор: 1 – солнечные лучи; 2 – потери вследствие отражения; 3 – стеклянное покрытие; 4 – поглощающее покрытие; 5 – тепловая изоляция; 6 – вход холодной жидкости; 7 – выход нагретой жидкости

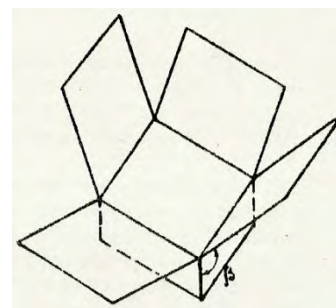


Рис. 2. Коллектор с плоскими зеркалами

Если предположить, что покрытие пластины, будучи полностью прозрачным для солнечного излучения, одновременно абсолютно непроницаемо для длинноволнового излучения, то его излучательную способность примем равной 1. Тогда обмен энергией между двумя пластинами оценивается выражением

$$Q = \xi \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (1)$$

а интенсивность теплообмена можно записать в виде

$$Q_1 = K_1 (T_1 - T_2) + \xi \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент теплопередачи от двух пластин.

Уравнения энергетического баланса для поглотителя и покрытия запишутся соответственно

$$\alpha_c Q = Q_1$$

или

$$Q_1 + Q_a = K \cdot (T_2 - T_a) + \sigma T_2^4, \quad (3)$$

где Q_a – интенсивность длинноволнового атмосферного излучения, поглощенного покрытием.

Решая совместно уравнения (1), (3) с учетом (2), для любых заданных условий получим равновесные температуры T_1 и T_2 .

Даже наличие одного слоя покрытия дает значительный эффект. В наших примерах равновесные температуры нейтрального и селективного поглотителей соответственно равны 386° K (113° C) и 467° K (194° C). Дальнейшее усо-

вершенствование коллектора иногда достигается нанесением дополнительных слоев прозрачных покрытий. Однако с увеличением их числа не только не уменьшаются потери энергии в поглотителе, но и вследствие поглощения в пленках покрытий (которым можно пренебречь только при наличии одного покрытия) ослабляется передача к нему солнечной энергии [19].

Другой недостаток многослойного покрытия связан с затруднением прохождения наклонно падающего излучения. Так для тонколистового стекла, подобного оконному, коэффициент пропускания при углах наклона лучей к нормали до 60° составляет 0.9, а при увеличении угла от 60° до 90° он линейно уменьшается до 0.

Дальнейшего повышения равновесной температуры поглотителя можно добиться, если с помощью зеркал сконцентрировать на нем энергию солнечного излучения (рис. 2). При использовании полностью отражающей зеркальной системы интенсивность облучения поглотителя увеличивается пропорционально отношению общей облучаемой поверхности зеркал к поверхности поглотителя. Этот показатель называется коэффициентом концентрации K . Зеркала монтируют таким образом, чтобы все падающие лучи были направлены на поверхность поглотителя. Если поглотитель квадратной формы снабжен четырьмя зеркалами (рис. 2) того же размера, установленными под углом $\beta=60^\circ$, то в этом случае K равен 3. На практике реализовать все достоинства подобной конструкции оказывается невозможным, поскольку отражающая способность зеркал меньше 100%, а при малых углах падения поглощательная способность поглотителя снижается. Тем не менее K бывает не ниже 2. В данных условиях равновесная температура плоского солнечного коллектора с зеркальными отражателями рассмотренного типа достигает 180°C (для нейтрального поглотителя) и 332°C (для селективного поглотителя). В данном случае с помощью рефлекторов усиливается лишь прямая составляющая солнечной радиации, так как сконцентрировать рассеянную составляющую оказывается невозможным [20].

Практическая часть

1. Изучить нахождение уравнения энергетического баланса для поглотителя и покрытия.
2. Познакомиться со схемой солнечных коллекторов.
3. Составить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Назовите различные виды гелиоприёмника.
2. Опишите работу плоского солнечного коллектора.
3. Как улучшить характеристики солнечного коллектора.
4. Опишите эффективный метод усовершенствования солнечного коллектора.
5. Назовите недостатки многослойного покрытия солнечного коллектора.

Лабораторная работа № 6. Гидравлические турбины

Цель работы: ознакомиться с принципом работы гидравлических турбин.

Теоретическая часть

Гидравлической турбиной называется двигатель, преобразующий энергию движущейся воды в механическую энергию вращения его рабочего колеса. Из основного закона механики жидкости: закона Бернулли следует, что удельная энергия H_1 на входе в рабочее колесо гидротурбины (рис. 1) составляет:

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g},$$

а на выходе из рабочего колеса

$$H_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g},$$

где p — давление, Па; ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; z — отметка уровня центра потока относительно принятой плоскости сравнения (высота), м; v — скорость, м/с.

Эти выражения представляются либо в линейных единицах высоты, либо в удельных энергетических, Дж/Н.

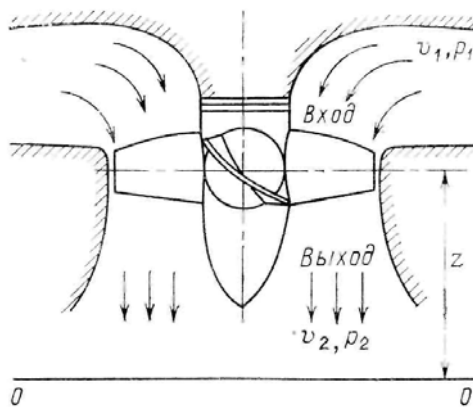


Рис. 1. Схема рабочего колеса турбины

Отданная водой рабочему колесу энергия будет равна разности энергий в потоке рабочего колеса до и после него:

$$H = H_1 - H_2 = z_1 - z_2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{v_1^2 + v_2^2}{2g}.$$

Таким образом, вся энергия потока состоит из энергии положения $z_1 - z_2$, энергии давления $\frac{p_1 - p_2}{\rho g}$ (образующих вместе потенциальную энергию) и кинетической энергии $\frac{v_1^2 + v_2^2}{2g}$.

В зависимости от того, какие из трех членов уравнений Бернулли главным образом реализуются в конструкции машины для создания напора, гидротурбины разделяются на несколько видов.

Гидротурбины, использующие хотя бы частично потенциальную энергию, называются реактивными. В таких гидротурбинах

$$z_1 - z_2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} > 0,$$

и, следовательно, процесс преобразования энергии на рабочем колесе происходит с избытком давления. Кроме того, в рабочем колесе турбины частично используется и кинетическая энергия потока.

Если гидротурбины используют только кинетическую энергию потока, то они называются активными. В таких турбинах $z_1 = z_2$, $p_1 = p_2$, т. е. вода поступает на рабочее колесо без избыточного давления. В целях достижения высокого к. п. д. в них почти весь напор преобразуется в скорость.

Мощность гидротурбины согласно уравнению может быть выражена так:

$$N_m = 9,81 Q_m H_m \eta_m,$$

где Q – расход воды, η – КПД турбины.

Из этой формулы следует, что сочетание Q_T и H_T может быть самым разнообразным и, следовательно, одну и ту же мощность от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт можно получить при малом Q_T и большом H_T и наоборот.

В практике принято гидротурбины подразделять на классы, системы, типы и серии.

Класс реактивных гидротурбин объединяет следующие системы: осевые, пропеллерные, поворотные-лопастные, диагональные и радиально-осевые гидротурбины. В класс активных гидротурбин входят системы турбин ковшовых, наклонно-струйных и двойного действия. Последние две системы не имеют такого широкого распространения, как ковшовые.

Каждая система содержит несколько типов, имеющих геометрически подобные проточные части и одинаковую быстроходность (частота вращения гидротурбины, работающей под напором 1 м и развивающей мощность в 1 л.с.), но различающихся по размерам. Геометрически подобные гидротурбины различных размеров образуют серию.

Кроме того, все гидротурбины условно делят на низко-, средне- и высоконапорные. Низконапорными принято считать гидротурбины, работающие при $H_T < 25$ м, средне-напорными — при $25 \leq H_T \leq 80$ и высоконапорными — при $H_T > 80$ м.

Гидротурбины подразделяют на малые, средние и крупные. К малым относятся гидротурбины, у которых диаметр рабочего колеса $D_1 \leq 1,2$ м при низких напорах и $D_1 \leq 0,5$ при высоких, а мощность составляет не более 1000 кВт.

К средним относятся гидротурбины, у которых $1,2 \text{ м} \leq D_1 \leq 2,5$ м при низких напорах и $0,5 \leq D_1 \leq 1,6$ м при высоких, а мощность $1000 \text{ кВт} \leq N_T \leq 15\,000$ кВт.

К крупным относятся гидротурбины, которые имеют D_1 и N_T больше, чем у средних.

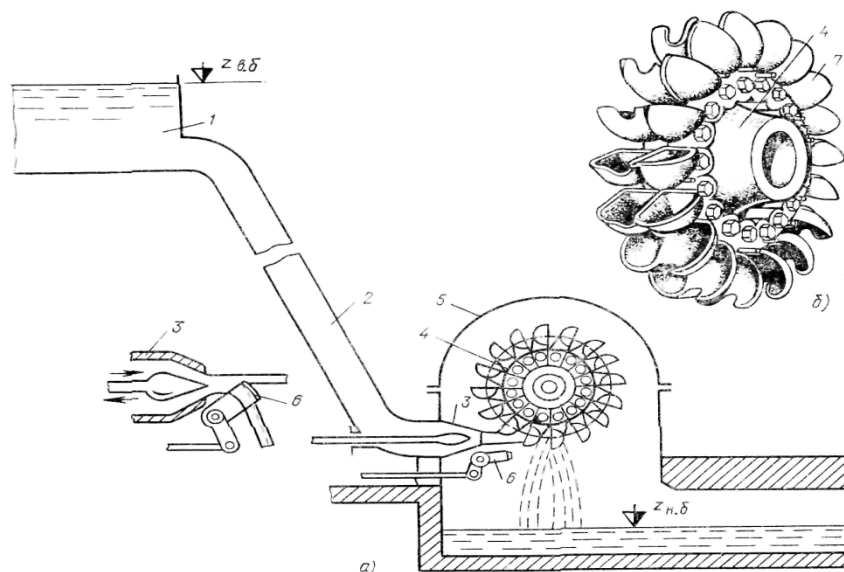


Рис. 2. Ковшовая турбина: *а* — схема турбинной установки; *б* — рабочее колесо

Активные гидротурбины. Наиболее распространенными активными гидротурбинами являются ковшовые (за рубежом их называют турбинами Пельтона). Принципиальная схема ковшовой турбины приведена на рис. 2. Вода из верхнего бьефа 1 подводится трубопроводом 2 к рабочему колесу 4, выполненному в виде диска, закрепленного на горизонтальном или вертикальном валу турбины и вращающегося в воздухе. По окружности диска расположены ковшеобразные лопасти (ковши) 7. На ковшах происходит преобразование гидравлической энергии, заключенной в струе, в механическую. Ковши равномерно распределяются по ободу рабочего колеса и последовательно, один за другим, при его вращении «принимают» струю [21].

Подвод воды к рабочему колесу осуществляется посредством сопла 3, внутри которого расположена регулирующая игла. Сопло представляет собой сходящийся насадок, из отверстия которого при работе турбины выбрасывается струя воды. В сопле вся энергия воды, подведенной к нему по трубопроводу за вычетом потерь, обращается в кинетическую. Рабочее колесо и сопла размещаются внутри замкнутого кожуха 5.

Игла, перемещаясь в сопле в продольном направлении, меняет его выходное сечение и тем самым регулирует диаметр выходящей струи, а значит, и расход воды через сопло. Игла в одном из крайних своих положений полностью закрывает сопло и останавливает турбину. Вода, отдав свою энергию рабочему колесу, стекает с него в отводящий канал (нижний бьеф).

В целях предотвращения значительного повышения давления в подводящем воду трубопроводе, являющегося следствием гидравлического удара, игла закрывается медленно. Для быстрого отвода струи от рабочего колеса применяется отклонитель 6, отбрасывающий воду в сторону. Перемещение иглы и отклонителя производится одновременно. Таким образом, в ковшовых турбинах осуществляется регулирование расхода и мощности турбины.

Конструктивные формы ковшовых турбин очень разнообразны и могут различаться по расположению вала (вертикальные и горизонтальные) и по числу сопл и рабочих колес на одном валу. Ковшовые турбины используются в диапазоне напора 300 — 1770 м с диаметром рабочего колеса до 7,5 м.

Реактивные гидротурбины. К реактивным гидротурбинам, как указывалось выше, относятся: радиально-осевые, пропеллерные, поворотнo-лопастные (включая двухперовую) и диагональные. Общий вид их рабочих колес представлен на рис. 3.

Для реактивных гидротурбин характерны следующие основные признаки. Рабочее колесо располагается полностью в воде, поэтому поток передает энергию одновременно всем лопастям рабочего колеса.

Перед рабочим колесом только часть энергии воды находится в кинетической форме, остальная представлена потенциальной энергией, соответствующей разности давлений до и после колеса.

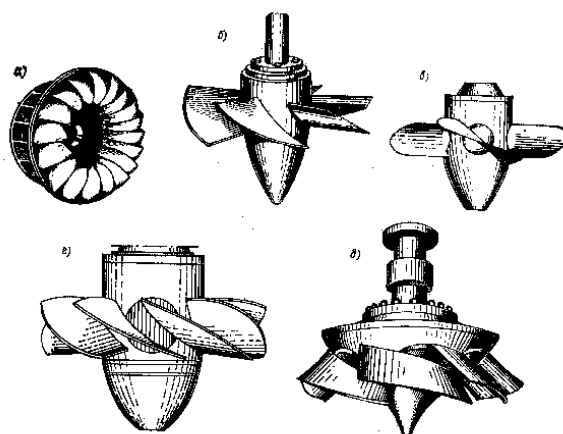


Рис. 3. Общий вид рабочих колес реактивных турбин: а — радиально-осевая; б — пропеллерная; в — поворотнo-лопастная; г — двухперовая; д — диагональная

Избыточное давление $p/\rho g$ по мере протекания воды по проточному тракту рабочего колеса расходуется на увеличение относительной скорости, т. е. на создание реактивного давления потока на лопасти. Изменение направления потока за счет кривизны лопастей приводит к возникновению активного давления потока. Таким образом, действие потока на лопасти рабочего колеса складывается из реактивного воздействия, возникающего вследствие увеличения относительной скорости, и активного давления, возникающего вследствие изменения направления потока[22].

Радиально-осевые гидротурбины (РО). Эти турбины (за рубежом их называют турбинами Френсиса) характерны тем, что вода при входе на рабочее колесо движется в радиальной плоскости, а после рабочего колеса в осевом направлении. Они используются в довольно широком диапазоне напоров от 30—40 до 600—650 м. Такой большой диапазон обеспечивается конструктивными особенностями рабочего колеса и турбины в целом.

Рабочее колесо радиально-осевой гидротурбины состоит из ряда лопастей 2 сложной пространственной формы, равномерно распределенных по

окружности ступицы 1 и обода 3 (рис. 3а, 4). Все три элемента объединены и представляют одну жесткую конструкцию. Число лопастей может колебаться от 9 для низконапорных до 21 для высоконапорных турбин. За диаметр рабочего колеса принимается максимальный диаметр по входным кромкам лопастей D_1 .

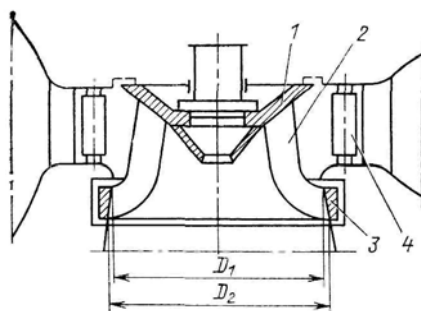


Рис. 4. Рабочее колесо радиально-осевой турбины

Перед рабочим колесом гидротурбины устанавливаются направляющий аппарат, вращающиеся лопатки 4 которого обеспечивают необходимое изменение расхода воды, проходящей через рабочее колесо, и наилучшее для обтекания его лопастей направление потока, что повышает КПД гидротурбины [23].

Лопастни рабочих колес крупных гидротурбин имеют в сечении по линии потока обтекаемую форму, что позволяет делать их значительной толщины для достижения необходимой прочности.

С увеличением используемого напора форма рабочего колеса радиально-осевых турбин изменяется: отношение выходного диаметра к входному D_2/D_1 уменьшается.

Высоконапорные гидротурбины иногда оборудуют холостыми выпускными для отвода воды из рабочего колеса и уменьшения за счет этого гидравлического удара при сбросе нагрузки.

Практическая часть

1. Отчет должен содержать цель работы.
2. Краткие теоретические сведения по гидравлическим турбинам.
3. Вывод по изученной работе.

Контрольные вопросы

1. Как можно определить мощность гидротурбины.
2. Какие типы гидротурбин вы знаете.
3. Расскажите принцип действия активной гидротурбины.
4. Расскажите принцип действия реактивной гидротурбины.
5. Расскажите принцип действия радиально-осевой гидротурбины.
6. Расскажите принцип действия двухперовой гидротурбины.

Лабораторная работа № 7. Плоскими коллекторами

Цель работы: познакомить студентов с работой и устройством плоских коллекторов.

Теоретическая часть

Системы с плоскими коллекторами

Системы горячего водоснабжения на основе плоского солнечного коллектора уже сейчас получили широкое распространение

На рисунке 1 показана схема солнечного водонагревателя. Находясь в контакте с поглотителем коллектора, вода нагревается и при помощи насоса или естественной циркуляции отвалился от него. Затем жидкость поступает в аккумулятор, откуда ее потребляет по мере надобности, или в теплообменник, через который энергия передается теплоносителе. Конструкция этих устройств может быть весьма сложной.

В устройстве, изображенном на рисунке 1, основным теплообменником является поглотитель. Жидкость либо омывает тыльную часть его пластины, либо проходит через систему труб, являющихся по существу частью этой пластины. В воздухонагревательных коллекторах пластины поглотителей имеют множество отверстий, при прохождении через которые воздух нагревается. В условиях хорошего теплообмена между окружающей средой и пластинами температуры поглотителя и жидкости одинаковы. Температуры на входе в поглотитель и на выходе из него будут разные. Перепад температур зависит от теплоемкости жидкости и ее скорости. При естественной циркуляции он составляет несколько десятков градусов[24].

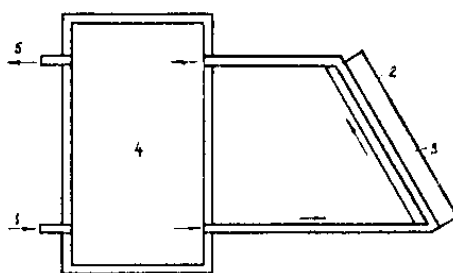


Рис. 1. Простой солнечный нагреватель с естественной циркуляцией:
1 - вход холодного теплоносителя, 2 - покрытие, 3 - поглотитель,
4 - аккумулятор тепла, 5 - выпуск нагретой воды

Чтобы определить, какое количество тепла получает жидкость от коллектора при различных температурах, используем следующий метод расчета. Рассмотрим коллектор с однослойным покрытием и поглотителем, поглотительная способность которого для солнечного излучения равна 0,9. Нейтральный называется поглотитель, имеющий при равновесной температуре коэффициент излучения близкий к 1,0; тогда как у селективного поглотителя он составляет примерно 0,1.

В обоих случаях считается, что стеклянное или пленочное покрытие коллектора непроницаемо для длинноволнового излучения. Если жидкость находится в тепловом контакте с поглотителем при температуре T , то она получает от него энергию при мощности P_n . В условиях равновесия уравнение энергетического баланса для поглотителя принимает вид

$$a_c P = P_1 + P_n, \quad (1.1)$$

где P – часть солнечной радиации, прошедшая через покрытие коллектора; P_1 – мощность, теряемая вследствие теплообмена с покрытием; P_n – полезная мощность; a_c – поглощательная способность пластины для данного вида радиации.

Для данной температуры поглотителя мощность P_1 постоянна. Поэтому полезная мощность P_n будет тем больше, чем больше величина P_1 , и наоборот, при снижении интенсивности солнечной радиации значение P_n уменьшается. При некотором значении $P = P_0$; $P_n = 0$, тогда

$$a_c P_0 = P_1 \quad (1.2)$$

Из уравнений (1.1-1.2) нетрудно определить P_1 и пороговую величину P_0 , начиная с которой при данной температуре поглотителя можно получать некоторую полезную мощность P_n .

$$a_c P_0 = a_c P - P_n \quad (1.3)$$

$$P_0 = P - \frac{P_n}{a_c} \quad (1.4)$$

Плоский коллектор имеет важнейшую особенность, которая заключается в следующем: с повышением температуры теплоносителя доля полезной мощности в общей мощности падающего излучения должна уменьшаться. Это неизбежно, поскольку увеличиваются потери тепла в окружающую среду.

Рассмотрим, как изменяется мощность коллектора в течение дня с изменением интенсивности солнечной радиации. В принципе, любой коллектор можно ориентировать по Солнцу, но это очень удорожает систему и экономически не оправдано. Поэтому в настоящее время используются преимущественно неподвижные коллекторы. Прежде всего необходимо выбрать наилучшую ориентацию коллектора. Теоретически можно рассчитать кажущуюся траекторию Солнца для любого времени года на любой широте. Годовое изменение высоты Солнца, обусловленное сезонным изменением склонения, составляет около 47° для полудня. Следовательно, при оценке параметров коллектора особое внимание следует уделить зимнему периоду времени, когда к системе предъявляются наиболее высокие требования и ее эффективность оказывается минимальной [25].

В середине зимы склонение составляет $23,5^\circ$, однако самое холодное время года наступает обычно позже (когда склонение несколько меньше).

Поскольку суша и Мировой океан обладают высокой теплоемкостью и выполняют роль аккумулятора тепловой энергии, то самое холодное время наступает спустя 4-6 недель после зимнего солнцестояния. Поэтому в Северном полушарии неподвижный коллектор ориентируют на Юг с таким наклоном, при котором нормаль к его поверхности указывает наивысшее полуденное положение Солнца в середине зимы. Для тропиков более целесообразно горизонтальное расположение коллектора, хотя оптимальным является угол, близкий к 30° .

Наибольшего эффекта в освоении солнечной энергии можно добиться в пустынях тропического пояса. Расчеты показывают, что параметры плоского коллектора, установленного на широте $23,5^\circ$ с.ш. с наклоном около 37° к горизонтали практически не меняются на протяжении года. В этом случае с каждого квадратного метра поверхности коллектора при температурах, подходящих для водонагревательных систем можно получать около 1000 кВт·ч энергии. Потребность же крупных больниц в этих районах составит около 500 МВт·ч в год. Следовательно, коллектор площадью 500 м² ее полностью удовлетворит, и его можно разместить на крыше больницы. В этом случае нет необходимости отводить для коллектора землю.

2. Расчет плоских коллекторов

2.1. Определение количества солнечной энергии, поступающей на поглощающую пластину

Работа плоского солнечного коллектора связана со многими тепловыми процессами, которые обусловлены расположением системы, теплопотерями, расходом теплоносителя, емкостью аккумулятора. Расчет начинается с определения энергии E_k , поступающей на поглощающую пластину. При горизонтальном расположении коллектора эта величина находится из литературы. В случае наклонного и вертикального расположения теплоприемников

$$\bar{E}_k = \bar{R}E, \quad (2.1)$$

где \bar{E} – среднемесячное суточное количество суммарного солнечного излучения, МДж/ м²с; \bar{R} - отношение среднемесячных суточных количеств солнечной радиации, поступающих на наклонную и горизонтальную поверхности.

Для наклонной поверхности с южной ориентацией

$$\bar{R} = \left(1 - \frac{e_2}{E} \right) \bar{R}_n + \frac{1 + \cos \beta}{2} \frac{\bar{e}_2}{E} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (2.2)$$

где \bar{e}_2 – среднемесячное суточное количество диффузной (рассеянной) энергии, поступающей на горизонтальную поверхность, МДж/м²с; \bar{R}_n – коэффициент пересчета прямого излучения с горизонтальной на наклонную поверхность; β - угол наклона коллектора (КСЭ) к горизонту, град. (оптимальный угол наклона β равен широте данной местности для систем круглогодичного действия, $\beta = \varphi + 15$, работающих в отопительной сезон, $\beta = \varphi - 15$. работающих только в летний период; ρ - коэффициент отражения для подстилающей поверхности Земли, $\rho = 0,2$ летом $\rho = 0,7$ зимой при наличии снежного покрова.

$$\bar{R}_n = \frac{\cos(\varphi-\beta) \cos \delta \sin \omega_3 + \frac{\pi}{180} \omega_3 \sin(\varphi-\beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_3 + \sin \varphi \sin \delta \frac{\pi}{180} \omega_3} \quad (2.3)$$

где φ – широта местности; $\delta = 23,45 \sin(360 \frac{284+h}{360})$ – склонение Солнца, град; n – порядковый номер суток году; $\omega_3 = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta)$ – часовой угол захода (восхода) Солнца для горизонтальной поверхности, град; $\omega_3 = \min \{ \omega_3 \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \operatorname{tg} \delta]$ – часовой угол захода (восхода) на наклонную поверхность, град. В качестве ω_3 принимается меньшая из двух величин в Фигурных скобках.

Таким образом, имея данные о расположении коллектора, необходимо рассчитать количество падающей солнечной энергии, которая передается теплоносителю, отражается и передается окружающей среде через изоляцию.

2.2. Расчет температур поверхности поглощающей пластины и теплоносителя на входе и выходе из коллектора

Тепловой расчет коллектора (рис. 2) сводится к определению теплопотерь, температур на входе и выходе из коллектора. Эти величины связаны с температурой поглощающей пластины.

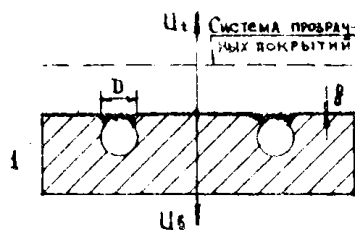


Рис. 2. Воздушный солнечный коллектор

В результате необходимо иметь соотношения, объединяющие их, которые решаются методом итерации. Для этого запишем

$$U_L = U_t + U_g,$$

U_L – общий коэффициент теплопотерь, Вт/м²К; U_t – коэффициент теплопотерь от поглощающей пластины к окружающей среде, Вт/м² К.

$$U_t = \left[\frac{N}{(344/T_{P_1m})[(T_{P_1m}-T_a)/(N+f)]^{0,31}} + \frac{1}{\alpha\omega} \right] + \frac{\sigma(T_{P_1m}+T_0)(T_{P_1m}+T_a)^2}{[\varepsilon_p + 0,0425 N(1-\varepsilon_p)]^{-1} + [2N+f-1/\varepsilon_g]-N}$$

где N – число стеклянных покрытий; T_{P_1m} – средняя температура поглощающей пластины, °К; T_a – температура окружающей среды, К.

$$f = (1,0 - 0,04 \alpha_\omega + 5 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \alpha^2_\omega) (1 + 0,058 N),$$

$\alpha_\omega = (5,7 + 3,8U)$, U – скорость среды над покрытием, м/с; $\varepsilon_p = (0,9 - 0,95)$ – степень черноты пластины; $\varepsilon_g = 0,88$ – степень черноты стекла (покрытия);

$\sigma = \delta_n C_0 \cdot 10^{-8}$ – коэффициент лучеиспускания; $U_g = \frac{\lambda_g}{\delta_g}$ – коэффициент теплопотерь через нижнюю изоляцию, Вт/м²К.

Теплота, переданная в коллекторе жидкости, определится

$$Q = S_C F_R [E_K - U_1 (T_{f,i} - T_a)],$$

где S_C – площадь поглощающей пластины,

$$F_R = \frac{G_{CP}}{U_L} (1 - e^{-U_L F / G_{CP}}), \quad (2.6)$$

где F_R – коэффициент отвода тепла из коллектора; G – массовый расход жидкости, кг/с; C_p – теплоемкость жидкости Дж/кг К.

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left\{ \frac{1}{U_L [D + (W-D)F]} + \frac{1}{C_e} + \frac{1}{n D_i d_{f,i}} \right\}}, \quad (2.7)$$

где W – расстояние между трубами, м; D – диаметр труб коллектора, м,

$$C_e = \frac{\lambda \cdot \delta}{\gamma},$$

Где λ – коэффициент теплопроводности соединения, Вт/м К; δ – длина слоя соединения, м; γ – средняя толщина слоя соединения, м; $d_{f,i}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к жидкости, Вт/м²К.

$$F = \frac{thm(W-D)/2}{m(W-D)/2}, \quad m = \sqrt{\frac{U_L}{\lambda \cdot \delta}} \quad (2.8)$$

$$T_{f,m} = T_{f,i} + \frac{Q_u}{U_L \cdot F_R} \left(1 - \frac{F_R}{F'}\right) \quad (2.9)$$

$T_{f,i}$ – температура жидкости на входе в коллектор, К.

$$T_{p,m} = Q_u R_{p-f} + T_{f,m},$$

где

$$R_{p-f} = \frac{1}{d_{f,i} n D_i n L}, \quad (2.10)$$

h – число труб коллектора; L – длина трубы в коллекторе, ис целью определения температур на входе и выходе из коллектора используем соотношение

$$\frac{T_t - T_a - E_k / U_L}{T_{f,t} - T_a - E_k / U_L} = e^{-(U_L w F U / G_{CP})},$$

$T_{f,y}$ – температура на выходе из коллектора при $y = L$.

Задаваясь предварительно температурой поглощающей пластины, рассчитывают ее по вышеприведенным уравнениям. Если она не совпадает, то подставляют уже найденную $T_{p,m}$ и снова ведут расчет до тех пор, пока не будет должного совпадения. Коэффициенты теплоотдачи определяются по методике, представленной в литературе [26].

Практическая часть

1. Изучить схему солнечного нагревателя.
2. Изучить схему воздушного солнечного коллектора.

3. Научиться рассчитывать количество солнечной энергии, поступающей на поглощающую пластину.

4. Научиться рассчитывать температуру поверхности поглощающей пластины и теплоносителя на входе и выходе из коллектора

Контрольные вопросы

1. Как изменяется мощность коллектора в течение дня.
2. Где достигается наибольший эффект освоения солнечной энергии.
3. Как определить количество солнечной энергии.
4. Как определить температуру поверхности поглощающей пластины.

Библиографический список

1. Пикус Г.Е., Основы теории полупроводниковых приборов, М.: Наука, - 1965. – 628 с.
2. Васильев А.М., Ландсман А.П., Полупроводниковые фотопреобразователи. – М.: Советское радио, - 1971. – 568с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.- М.: Мир, 1984.
4. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. –М.: Лань, -2003.- 368 с.
5. Григоров И.Н. Зарядка аккумуляторов с помощью солнечных батарей. – 2002. Электронный ресурс
6. Кашкаров А. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. Издательство: ДМК Пресс
7. *Д. де Рензо, В. В. Зубарев* Ветроэнергетика. Москва. Энергоатомиздат, 1982
8. *Е. М. Фатеев* Вопросы ветроэнергетики. Сборник статей. Издательство АН СССР, 1959
9. «Второе пришествие ветроэнергетики», А. Солоницын, «Наука и Жизнь» № 3, 2004 год (Проверено 15 сентября 2009)
10. «Башня из ветроэнергетических модулей», Л. Хаскин, «Наука и Жизнь» № 9, 2003 год
11. Бринкворт Б.Дж. Солнечная энергия для человека: М.: Мир, 1976. 278 с.
12. Берковский Б.М., Кузьминов В.А. Возобновляемые источники энергии на службе человека. М.:Наука, 1987. 125 с.
13. Богославский В.Н. Энергия окружающей среды и строительное проектирование. М.:Стройиздат. 1983. 125 с.
14. Дафдж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М.: Мир, 1971. 420 с.
15. Кириллин В.А. Энергетика: Главные проблемы. М.: Знание, 1990. 121 с.
16. Внутренние санитарно-технические устройства: Справочник проектировщика. Ч1: Отопление. М.: Стройиздат, 1990. с.1975-191.
17. Климат Волгограда/Под ред. Швер Ц.А.: Справочник. Л.: Гидрометеиздат. 1989. 216 с.
18. Selsun K., Thermal and Economic Analysis of the Overlapped- Glass Plate Solar-Air Heaters // Solar Energy. 1971 13. с. 165
19. Амид Г., Бекман У. Характеристики набранных из проволочных сеток матриц при радиационном обогреве и воздушном охлаждении// Тр. Амер. об-ва ин.-мех. Сер А.: Энергетические машины и установки. 1971. № 2, с.57
20. Михеев М.А., Михеев И.М. Основы теплопередачи: М.: Энергия, 1973. 318 с.
21. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.: ил.
22. Непорожний П.С., Обрезков В.И. Введение в специальность. Гидроэнергетика. М.: Энергоатомиздат, 1982. – 304 с.: ил.
23. Карницкий В.Ю Резник А.Я. Методические указания к лабораторным работам, Тула, 2009, 11 с.
24. Бринкворт Б. Дж. Солнечная энергия для человека: М: Мир, 1976. 278 с.
25. Берковская Б.И., Кузьминов В.А. Возобновляем» источника энергии на службе человека. М.: Наука, 1987. 125 с.
26. Богословский В.Н. Энергия окружающей среды и строительное проектирование. М.: Стройиздат, 1963. 125 с.

Публикуется в авторской редакции

Минимальные систем. требования:

PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0.

Подписано в свет 21.11.2018

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Волгоградский государственный технический университет»

400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

<http://www.vgasu.ru>, info@vgasu.ru