

## **Производство электрической энергии традиционным способом**

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия установок, вырабатывающих электрическую энергию традиционным способом.

**Порядок выполнения работы:**

- 1) изучить назначение, классификацию, устройство и принцип действия установок производящих электрическую энергию;
- 2) составить отчет о выполненной работе.

### **Общие сведения**

Человечество за всю историю своего существования израсходовало примерно 900 – 950 триллионов кВт·ч энергии всех видов и около 2/3 этого количества приходится на последние 30 лет.

Основные источники энергии на нашей планете имеют четкие сроки истощения ресурсов:

- уголь, первая половина этого тысячелетия;
- нефть, на границе 21 и 22 веков;
- газ, первая половина 21 века;
- уран, начало следующего столетия.

Республика Беларусь располагает лишь небольшими запасами органического топлива (таблица 1.1) и только 15 – 18% потребностей покрывается внутренними ресурсами (5,7 млн. т у. т.).

Таблица 1.1. Ресурсы источников энергии в Республике Беларусь

Наименование источника энергии	Годовые ресурсы, млн. т у. т.	% от общего количества
Традиционные энергоресурсы	6,65 – 8,15	15,4 – 43,7
Нефть	3,0	11 – 14
Попутные нефтяные газы	0,65	2,5 – 3,0
Торф, дрова, бытовые отходы	3,0 – 4,6	11 – 21,5
Возобновляемые источники энергии	14,8 – 18,1	56,3 – 84,6
Энергия ветра	1,9	7,2 – 8,9
Энергия малых рек	0,11	0,4 – 0,5
Энергия биомассы	3,5 – 4,0	13,3 – 18,7
Энергия природного газа	0,25	0,9 – 1,2
Солнечная энергия	5,5 – 8,3	20,9 – 38,8
горячее водоснабжение	3,0 – 4,6	11 – 21,5
электроэнергия	2,5 – 3,7	9,5 – 17,3
Вторичные энергоресурсы	3,5	13,3 – 16,3

Объем произведенной в Беларуси в 2023 году электроэнергии составил более 41 млрд кВт•ч.

В состав ГПО «Белэнерго» входит 67 генерирующих энергоисточников. На 42 тепловые электростанции, в том числе 12 ТЭС высокого давления, приходится порядка 67% произведенной электроэнергии, 24 гидроэлектростанции выработали в течении года около 1% от общего количества, доля Белорусской АЭС составляет 32%. При этом совокупная мощность всех белорусских энергоисточников на треть больше того, что они производят сегодня.

**Тепловые электростанции** делятся на два типа: конденсационные (ГРЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ).

ГРЭС вырабатывают только электрическую энергию и поэтому их коэффициент полезного действия составляет не более 40% (в будущем – 50 – 55%). Распределение потерь энергии на ГРЭС представлено на рис. 1.1.

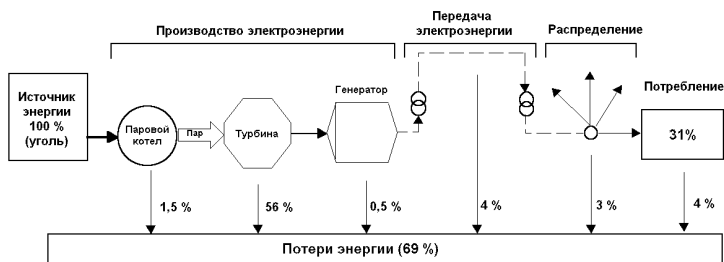


Рис. 1.1. Распределение потерь энергии на ТЭС

Самая крупная электростанция Беларуси – Лукомльская ГРЭС, мощностью 2560 МВт использует при производстве природный газ и топочный мазут. К числу крупнейших электрических станций следует отнести Березовскую ГРЭС (установленная мощность – 930 МВт).

На ТЭЦ часть тепла в виде горячей воды или пара направляется на коммунальные и производственные нужды. Общий КПД ТЭЦ (70%) значительно выше КПД конденсационной электростанции. Схема ТЭЦ представлена на рис. 1.2.

Современные ТЭС оказывают большое влияние на окружающую среду. Для обеспечения их работы привлекаются значительные природные ресурсы (топливо, вода, реагенты, строительные материалы). Через технологические (топливоснабжение) и

естественные (сток рек, воздушные течения, подземная фильтрация) связи их влияние передается на значительные расстояния и должно быть учтено, локализовано и максимально нейтрализовано.

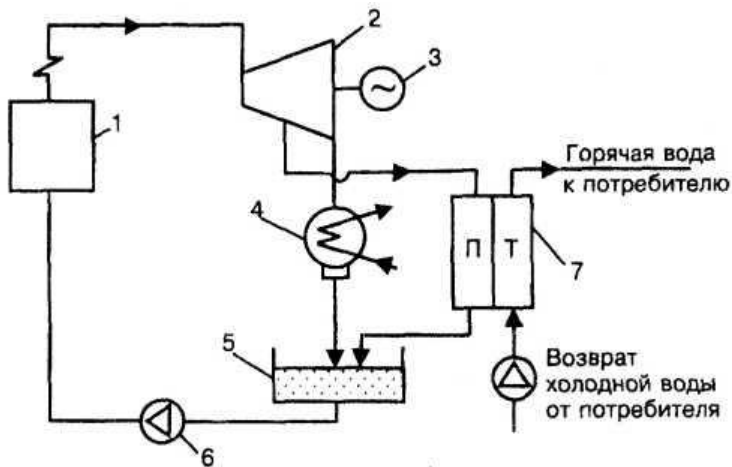


Рис. 1.2. Схема ТЭЦ;

1-паровой котел; 2-турбина; 3-электрогенератор; 4-конденсатор;  
5-питательный бак; 6-подогреватель

Размеры площадок ТЭС достигают 3–4 км<sup>2</sup>. На этой территории полностью изменяется рельеф местности, характеристики и распределение воздушных течений и поверхностного стока, нарушается почвенный слой, растительный покров, режим грунтовых вод. Эти изменения, а также производственные шумы и освещенность в ночное время приводят к нарушению экологического равновесия.

Выброс больших масс теплоты и влаги вызывает снижение солнечной освещенности, образование низкой облачности и туманов, морозящих дождей, инея, гололеда, обледенения дорог и конструкций. В теплое время года в результате испарения капель, достигших земли, возможно засоление почв.

Создание водохранилищ-охладителей для мощных электростанций с поверхностью 20–30 км<sup>2</sup> приводит к перераспределению стока, изменению режима паводков, разливов, восполнения запасов грунтовых вод, условий разведения рыбы.

Сточные воды и ливневые стоки с территории ТЭС загрязняются отходами технологических циклов энергоустановок (нефтепродукты, шлаки, обмывочные воды). Их сброс в водоемы может оказаться губительным для водных организмов, снижает способность водоема к самоочищению.

Отрицательное влияние на природные условия оказывают золоотвалы – земля исключается из сельскохозяйственного оборота. Пыление золоотвалов приводит к гибели растений.

В технологических циклах электростанций более 95% охлаждающей воды нагревается на 9–10 °С, в водоемы сбрасывается большое количество теплоты, которая нарушает естественные условия существования экологических систем.

Газопылевые выбросы ТЭС загрязняют атмосферу углекислотой, золой, оксидами азота, сернистой и серной кислотой, что вызывает коррозию сооружений и оборудования, уменьшает солнечное облучение территории.

Среди основных направлений охраны окружающей среды от вредного воздействия ТЭС следует отметить применение природосберегающих технологий при производстве энергии. К их числу относятся технологии, которые увеличивают коэффициент использования топлива (ТЭЦ вместо КЭС, АЭС вместо ТЭС на органическом топливе) и соответственно уменьшают количество прямых (зола, шлак) и вторичных (обмывочные воды) загрязнений. К ним относятся различные способы деструктивной переработки топлив (получение метанола, синтез газа, водорода и т.д.), позволяющие более полно произвести выделение потенциальных загрязнителей (серы) на ранних стадиях использования топлива. Сюда же относится применение замкнутых технологических циклов: полное использование золы ТЭС, получение из дымовых газов азота и технической серной кислоты, улавливание и последующее сжигание нефтемаслопродуктов из отходящих вод.

Эти методы относятся к активным способам защиты окружающей среды.

Пассивные способы предусматривают применение устройств, улавливающих загрязнения на конечных стадиях технологического процесса (золоуловители, очистные сооружения) или способствующих их разбавлению до концентраций, меньших предельно допустимых (высокие дымовые трубы, шумопоглотители).

Среди теплоэлектроцентралей установленной мощностью по выработке электрической энергии выделяются: Минские ТЭЦ-4 (1030 МВт), ГЭЦ-3 (420 МВт). ТЭЦ-5 (330 МВт). Гомельская ТЭЦ-2 (540 МВт), Могилевская ТЭЦ-2 (345 МВт), Новополоцкая ТЭЦ (505 МВт), Светлогорская ТЭЦ (260 МВт). Мозырская ТЭЦ (195 МВт), Бобруйская ТЭЦ-2 (180 МВт).

**Гидроэлектростанции.** Гидроэлектростанции и их оборудование используются очень долго, турбины, например, – около 50 лет. Это объясняется условиями их эксплуатации: равномерный режим работы при отсутствии экстремальных температурных и других нагрузок.

Гидроэлектростанция (ГЭС) имеет следующую технологическую схему: ГТ (гидравлическая турбина) – ГГ (гидрогенератор) – Тр (трансформатор).

Недостатком ГЭС являются большие первоначальные затраты на сооружение, что связано с большим объемом земляных и строительных работ. В то же время их КПД достигает 80 – 90%. Самые мощные ГЭС построены и эксплуатируются в России (Красноярская мощностью 6 млн. кВт, Саяно-Шушенская мощностью 6,4 млн. кВт).

Наиболее сложными проблемами гидроэнергетики являются: ущерб, наносимый окружающей среде (особенно от затопления больших площадей при создании водохранилищ), заиливание плотин, коррозия гидротурбин и в сравнении с тепловыми электростанциями большие капитальные затраты на их сооружение. Поэтому особенно перспективным в настоящее время является использование гидроэнергетических ресурсов малых рек без создания искусственных водохранилищ.

Сегодня современные гидроэлектростанции — это огромные сооружения на гигаватты установленной мощности. Однако принцип работы любой ГЭС остается в целом достаточно простым, и везде почти полностью одинаковым. Напор воды, направленный на лопасти гидротурбины, приводит ее во вращение, а гидротурбина в свою очередь, будучи соединена с генератором, вращает генератор. Генератор вырабатывает электроэнергию, которая и подается на трансформаторную станцию, а затем и на ЛЭП (рис. 1.3).

Республика Беларусь – преимущественно равнинная страна, тем не менее ее гидроэнергетические ресурсы достаточно существенны. Потенциальная мощность рек Беларуси составляет 855 МВт (7,5 млрд. кВт-ч. в год), технически возможные ресурсы оцениваются в 3 млрд. кВт-ч. в год.

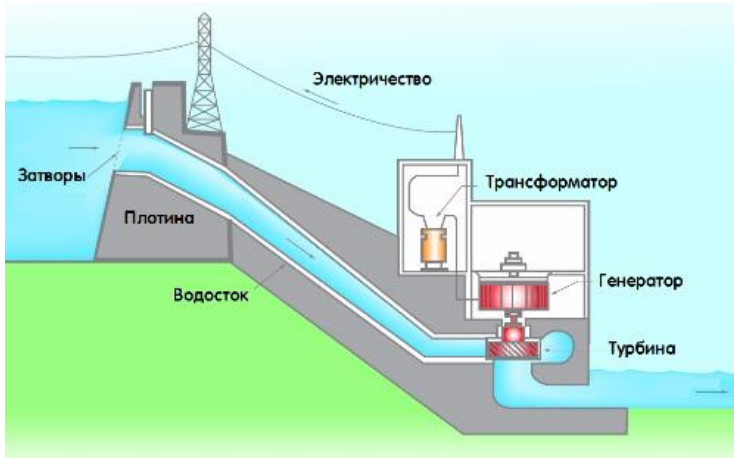


Рис. 1.3. Схема гидроэлектростанции

В различные периоды на территории Беларуси было построено 24 гидроэлектростанций небольшой мощности. Сейчас работают 11 станций, наиболее крупные – Осиповичская (2,2тыс. кВт) Свислочьская и Чигиринская (1,5тыс. кВт).

**Атомные электрические станции.** Тепловые схемы атомных электростанций зависят от типа реактора, вида теплоносителя, состава оборудования. Тепловые схемы могут быть одно-, двух- и трехконтурными.

В одноконтурных схемах (рис. 1.4) пар вырабатывается непосредственно в реакторе. Полученная пароводяная смесь (паросодержанием до 15%) подается в барабан-сепаратор, отсепарированный насыщенный пар поступает в паровую турбину. Отработавший в турбине пар конденсируется, и конденсат циркуляционным насосом подается в реактор. Одноконтурная схема наиболее проста в конструктивном отношении и достаточно экономична. Однако рабочее тело на выходе из реактора становится радиоактивным, что предъявляет повышенные требования к биологической защите и затрудняет проведение контроля и ремонта оборудования.

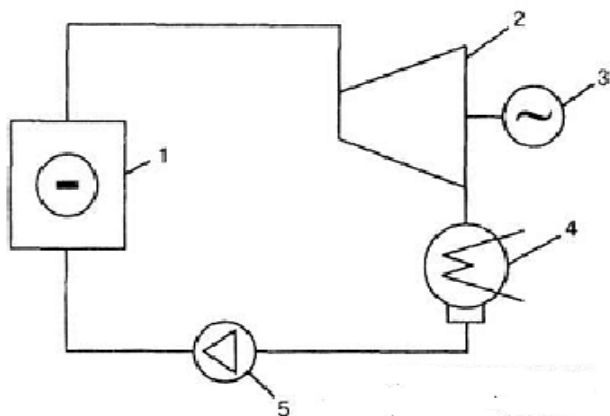


Рис. 1.4. Типовая схема простейшей одноконтурной атомной электростанции:  
 1–ядерный реактор; 2–турбина; 3–электрогенератор; 4–конденсатор;  
 5–питательный насос

В двухконтурных схемах (рис. 1.5) существуют два самостоятельных контура.

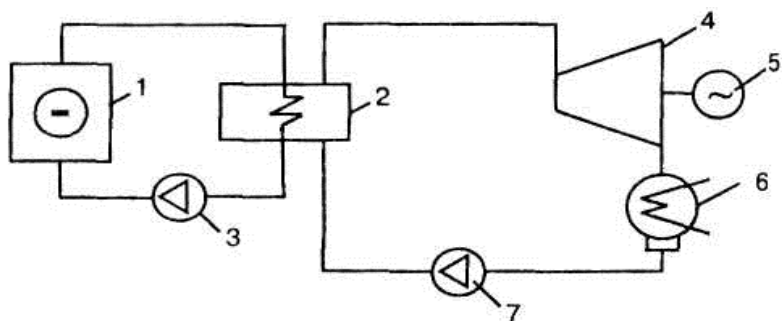


Рис. 1.5. Типовая схема простейшей двухконтурной атомной электростанции:  
 1–ядерный реактор; 2–теплообменник-парогенератор; 3–главный циркуляционный насос; 4–турбина; 5–электрогенератор; 6–конденсатор; 7–питательный насос

Контур теплоносителя – первый; контур рабочего тела – второй. Общее оборудование обоих контуров – парогенератор. Нагретый в реакторе теплоноситель поступает в парогенератор, где отдает свою

теплоту рабочему телу и при помощи главного циркуляционного насоса возвращается в реактор. В первом контуре находится компенсатор объема, который регулирует поддержание давления в контуре при изменении температуры. Давление в первом контуре значительно выше, чем во втором. Полученный в парогенераторе пар подается в турбину, совершает в ней работу, конденсируется, конденсат питательным насосом подается в парогенератор. Наличие парогенератора хотя и усложняет установку и уменьшает ее экономичность, но препятствует появлению радиоактивности во втором контуре.

В трехконтурной схеме теплоносителями первого контура служат жидкие металлы, например натрий. Радиоактивный натрий первого контура из реактора направляется в теплообменник, где отдает теплоту натрию промежуточного контура, и циркуляционным насосом возвращается в реактор. Давление натрия в промежуточном контуре выше, чем в первом, для исключения утечек радиоактивного натрия. Натрий промежуточного контура отдает теплоту в парогенераторе рабочему телу (воде) треть его контура. Образующийся в парогенераторе пар поступает в турбину, совершает работу, конденсируется и питательным насосом подается в парогенератор.

Трехконтурная схема требует больших затрат, но обеспечивает безопасную эксплуатацию реактора.

Работа АЭС по технологическим условиям отличается от работы тепловой электростанции. Основным различием является то, что роль источника теплоты на тепловой электростанции играет паровой котел, в котором сжигается органическое топливо, а на АЭС – ядерный реактор, теплота в котором выделяется в результате деления ядерного топлива. Ядерное топливо обладает высокой теплотворной способностью (в миллионы раз выше, чем органическое). В одном грамме урана содержится  $2,6 \cdot 10^{21}$  ядер; при делении всех этих ядер выделяется энергия, равная 2000 кВт·ч. Для получения такого количества энергии нужно сжечь более 2000 кг угля. В связи с этим при эксплуатации АЭС расходы по доставке и транспортировке топлива сведены к минимуму. Однако при эксплуатации АЭС в процессе работы ядерного реактора образуется большое количество радиоактивных веществ в топливе, конструкционных материалах, теплоносителе. Поэтому АЭС является потенциальным источником радиационной опасности для обслуживающего персонала, а также окружающего населения, что повышает требования к надежности и безопасности ее

эксплуатации. В мире, доля вырабатываемой энергии АЭС составляет более 10%.

В процессе работы АЭС образуются жидкие, газообразные, аэрозольные и твердые радиоактивные отходы. Присутствие в этих отходах долгоживущих изотопов продолжительное время сохраняет их активность на достаточно высоком уровне. При эксплуатации АЭС осуществляется тщательный контроль за образованием радиоактивных отходов, а перед поступлением их во внешнюю среду устанавливается многобарьерная система фильтров и защитных устройств.

Твердыми отходами являются детали загрязненного радиоактивными веществами демонтированного оборудования, отработанные фильтры для очистки воздуха, сорбенты, спецодежда, мусор. Их захоронение осуществляется в специальных траншеях. Объем их может быть уменьшен прессованием или сжиганием при соответствующей очистке продуктов сгорания.

Радиоактивные воды АЭС перерабатываются с помощью спецводоочисток. Их принцип работы – испарение воды, осаждение твердой фазы и ионный обмен. Образующиеся концентраты и растворы реагентов направляются в хранилище жидких отходов.

Газовые и аэрозольные отходы подвергаются очистке на многоступенчатых фильтрах, выдержке в очистных устройствах и выбрасываются в атмосферу через высокие трубы (100–150 м). Возможна также сорбция радиоактивных газовых составляющих активированным углем.

Для АЭС основным фактором радиационной опасности является внешнее ионизирующее излучение. С точки зрения радиационного загрязнения окружающей среды АЭС – более чистые по сравнению с угольными электростанциями: в угле содержатся естественные радиоактивные элементы – радий, торий, уран, полоний и др., которые вместе с золой выбрасываются в атмосферу (пылеугольная ТЭС мощностью 1200 МВт, потребляя 3,4 млн т угля в год, выбрасывает в атмосферу ежегодно 130 тыс. т золы). Их активность составляет 100 мбэр/год, для АЭС аналогичной мощности величина радиоактивных выбросов – 0,5–1 мбэр/год.

Основной принцип при переработке и захоронении радиоактивных отходов заключается в их концентрировании в малых объемах с последующим вечным захоронением в таких местах, где обеспечивается полный радиоактивный распад вне контакта с биосферой (600 лет).

Отходы отверждаются (битумируются и остекловываются) для связывания радиоактивных веществ. Последующее хранение – в герметических железобетонных емкостях или металлических контейнерах. Лучшими местами для захоронения являются заброшенные соляные копи (отсутствие воды, спокойные в сейсмическом отношении районы, большие объемы подземных пустот).

В 2011 году в Гродненской области начато строительство Белорусской АЭС. Для ее строительства выбран проект АЭС-2006 — типовой российский проект атомной станции нового поколения с использованием водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-1200. Планируемая мощность 2400 МВт. Ввод в строй первого реактора произошел в 2019 году.

**Газотурбинные установки** достаточно компактны, маневренны, используются в теплоэнергетике как пиковые и резервные установки. Их принцип работы аналогичен двигателям внутреннего сгорания. Принципиальная схема ГТУ с подводом тепла при постоянном давлении изображена на рис. 1.6.

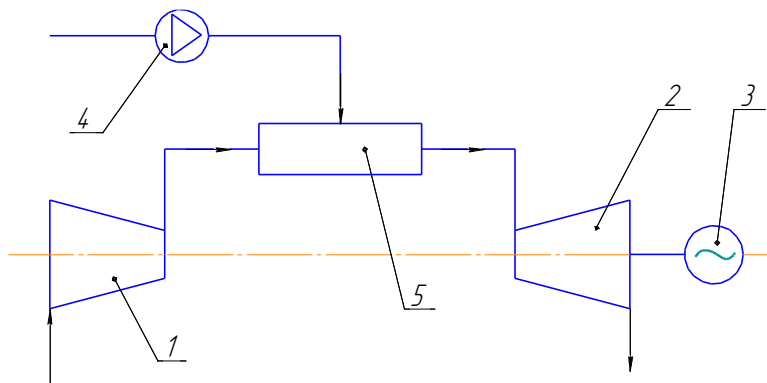


Рис. 1.6. Схема ГТУ:

1–воздушный компрессор; 2–газовая турбина; 3–электрогенератор;  
4–топливный насос; 5–камера сгорания

Воздушный компрессор сжимает воздух адиабатно (без подвода теплоты), повышая его давление и температуру, и подает его в камеру сгорания, в которую топливный насос дозированно впрыскивает горючее. В камере сгорания осуществляется подвод теплоты при постоянном давлении (сжигание топлива), температура при этом растет.

Образующиеся продукты сгорания топлива подаются в газовую турбину. В газовой турбине продукты сгорания расширяются адиабатно (без подвода теплоты) и совершают техническую работу. При этом давление и температура падают. Далее продукты сгорания выбрасываются в атмосферу. Значительная часть технической работы газовой турбины (примерно 2/3) расходуется на привод компрессора, расположенного на том же валу. Остальная часть технической работы (полезная работа) идет на выработку электроэнергии в электрогенераторе. Температура газов перед турбиной 800 – 900 °С (для авиатурбин – 1200 °С), поэтому необходимо использование жаропрочных материалов.

**Парогазовые установки.** Поскольку в газовом цикле ГТУ температура газов перед турбиной составляет 800 – 900 °С, а после турбины примерно 350 °С (в цикле паросиловой установки температура перегретого пара перед турбиной 540 – 565 °С; температура воды в конденсаторе 25 – 28 °С), видно существенное различие в температурном уровне рабочих температур рассмотренных циклов. Для повышения эффективности предлагается комбинированный (бинарный) цикл, в котором работают два рабочих тела: газ – в верхней части цикла, пар – в нижней (рис. 1.7).

Воздух из атмосферы поступает в компрессор 1, где сжимается адиабатно с повышением температуры, и подается в камеру сгорания 5, куда при помощи топливного насоса 4 впрыскивается топливо. В камере сгорания 5 при постоянном давлении происходит горение топлива (подвод теплоты), образовавшиеся в результате горения газы поступают в газовую турбину 2, где, расширяясь адиабатно на лопатках турбины, производят работу. Температура и давление газов падают. Отработанные газы после газовой турбины с температурой 350 °С поступают в подогреватель 6, где отдают часть теплоты для подогрева питательной воды, поступающей в котел 7, и охладившись при этом, сбрасываются в атмосферу.

Питательная вода воспринимает эту теплоту при постоянном давлении, что приводит к уменьшению расхода топлива при производстве пара в котле.

Далее в котле из питательной воды образуется пар, перегревается и поступает в паровую турбину 8 с температурой 540 °С. В паровой турбине пар расширяется адиабатно на лопатках, производя техническую работу. Его давление и температура при этом падают. Отработавший в турбине пар поступает в конденсатор 9, где

конденсируется при постоянном давлении, а образовавшийся конденсат при помощи насоса *10* направляется сначала в подогреватель *6*, где воспринимает тепло отработавших в газовой турбине газов, а затем в паровой котел *7*. Расходы пара и газа подбираются таким образом, чтобы вода воспринимала максимальное количество теплоты газов. Термический КПД таких установок свыше 60%.

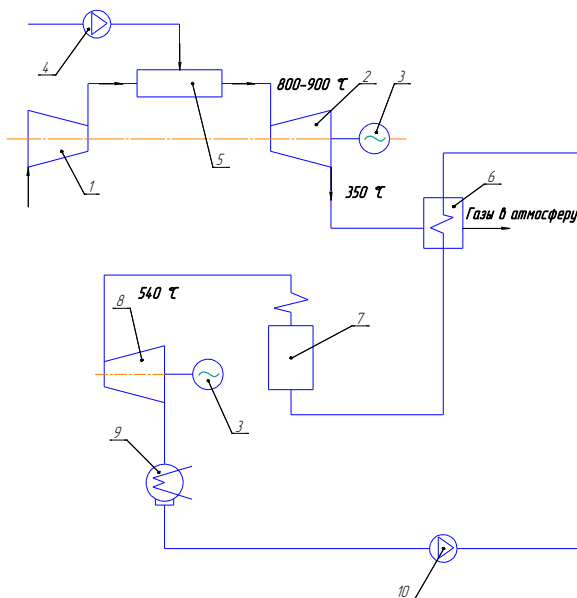


Рис. 1.7. Схема парогазовой установки

1–воздушный компрессор; 2–газовая турбина; 3–электрогенератор;  
4–топливный насос; 5–камера сгорания; 6–подогреватель; 7–котел;  
8–паровая турбина; 9–конденсатор; 10–питательный насос.

## Содержание отчета

1. Цель работы;
2. Распределение потерь энергии на ТЭС (рисунок 1.1.);
3. Типовая схема простейшей двухконтурной атомной электростанции (рисунок 1.5);
4. Направления использования газотурбинных и парогазовых установок;
5. Энергетический потенциал Республики Беларусь.

## **Контрольные вопросы**

1. Конструкция, принцип работы и основные характеристики ТЭС и ГЭС.
2. Назначение основного оборудования ТЭС и ГЭС.
3. Конструкция, принцип работы и основные характеристики газотурбинной и парогазовой установки.
4. Аргументированный вывод о перспективности использования различных способов получения электрической энергии на территории Республики Беларусь.

## Фотоэлектрические преобразователи энергии

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия фотоэлектрических преобразователей и солнечных батарей.

**Порядок выполнения работы:**

- 1) изучить назначение, классификацию, устройство и принцип действия фотоэлектрических преобразователей энергии;
- 2) рассмотреть устройство и принцип действия солнечных батарей;
- 3) составить отчет о выполненной работе.

### Общие сведения

Республика Беларусь, расположенная между  $51^\circ$  и  $56^\circ$  северной широты, относится к районам, находящимся в нижней части полосы умеренной солнечной радиации ( $30 - 60^\circ$ ). Общий потенциал солнечной энергии в Республике Беларусь оценивается в  $2,7 - 10^6$  млн. т у. т. в год, технически возможный составляет  $0,6 - 10^6$  млн. т у. т. в год.

Энергетическая программа Республики Беларусь предусматривает крупносерийное производство гелиоводоподогревательных установок, разработанных белорусскими учеными. Найденные ими удачные технические решения делают их производство более технологичным и многократно снижают их вес. К 2030 г. планируется их применение, обеспечивающее эквивалентную экономию 50 тыс. т у. т. в год.

**Фотоэлектрические преобразователи**, или солнечные элементы (*solar cells*), – это полупроводниковые изделия, преобразующие солнечное излучение в электрическую энергию за счет внутреннего фотоэффекта.

В настоящее время наибольшее распространение получили кристаллические кремниевые (80–85 % мирового рынка) и тонкопленочные солнечные элементы (менее 10 % рынка).

Самой важной и дорогой частью солнечного элемента является кремниевая пластина. Она может быть как поликристаллической, так и монокристаллической.

Поликристаллические пластины (рисунок 2.1, а) изготавливают из полуфабриката высокой степени очистки, состоящего из мелких кристаллитов кремния. Такие пластины имеют правильную квадратную форму. Более простая технология производства поликристаллических солнечных элементов (*multi-Si*) обеспечивает их меньшую стоимость, однако неоднородная атомная структура снижает эффективность

генерации электроэнергии (12–20 %) и сокращает срок их службы по сравнению с монокристаллическими.

Монокристаллические пластины (рис. 2.1, б) представляют собой фрагмент одного кристалла кремния. Кристалл выращивают в виде цилиндрических слитков, из которых проволочной резкой получают псевдоквадратные пластины требуемой толщины. Такая форма обеспечивает рациональное использование кремния из слитка и лучшее заполнение поверхности будущего солнечного модуля (солнечной батареи). Эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую у монокристаллических солнечных элементов (*моно-Si*) составляет 20–25 %.

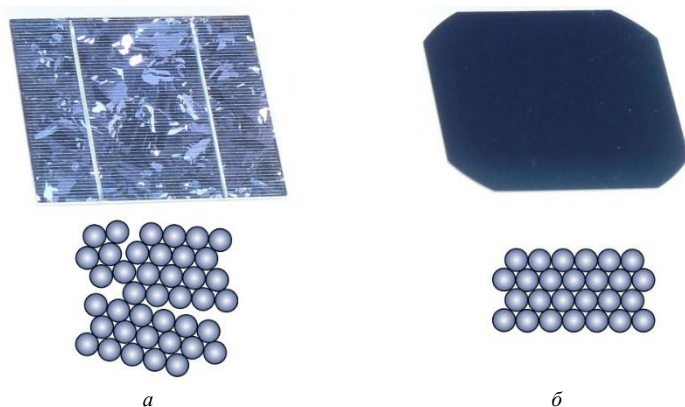


Рис. 2.1. Пластины солнечных элементов и структура атомов кремния  
а – поликристаллическая; б – монокристаллическая

После резки и последующей химической обработки пластины имеют гладкую поверхность, которая отражает существенную часть падающего на нее излучения. Так как для получения эффективных солнечных элементов важно преобразовать в электричество как можно больше солнечного света, то поверхность стараются сделать неровной на микроуровне. Эта операция называется текстурированием и выполняется последовательным травлением пластин в кислотных и щелочных растворах.

Текстурированная поверхность представляет собой множество хаотично расположенных микропирамид (рис. 2.2, а). Излучение попадает на поверхность пирамиды и, отразившись от нее, направляется

в глубь пластины, где вновь встречается с гранью соседней пирамидки (рис. 2.2, б). Таким образом, за счет создания текстурированной поверхности удается снизить коэффициент отражения пластины с 35 до 11 %.

Ключевым элементом конструкции кристаллических кремниевых солнечных элементов является  $p-n$  переход. Полупроводник в зависимости от типа проводимости может быть  $n$ -типа (электронная проводимость) или  $p$ -типа (дырочная проводимость). При этом если на пластину полупроводника одного типа нанести слой другого типа, то место их контакта будет являться  $p-n$  переходом.

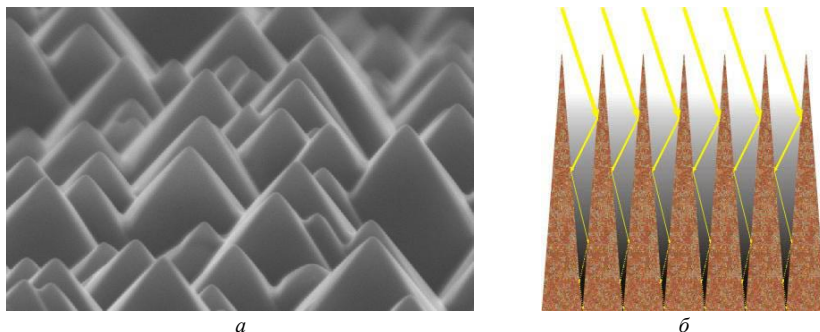


Рис. 2.2. Текстурирование кремниевых пластин:  
 $a$  – поверхность пластины;  $b$  – схема поглощения излучения

Одним из главных свойств  $p-n$  перехода является его способность быть энергетическим барьером для носителей тока, т. е. пропускать их только в одном направлении. На этом эффекте базируется генерация электрической энергии в солнечных элементах.

Фотоны солнечного света  $I$  (рис. 2.3), падающего на поверхность элемента, проникают внутрь пластины, где встречаются с атомами кремния и «выбивают» из них электроны. При этом одновременно образуется две заряженные частицы: отрицательный электрон  $e^-$  и положительная дырка – незаполненная валентная связь атома, которая проявляет себя как положительный заряд, численно равный заряду электрона.

Благодаря наличию  $p-n$  перехода в солнечном элементе электроны и дырки движутся во взаимно противоположных направлениях. Электроны беспрепятственно проникают через  $p-n$  переход и накапливаются в полупроводнике  $n$ -типа 4, который получает

отрицательный заряд. Дырки не могут преодолеть  $p$ - $n$  переход и вынуждены оставаться в полупроводнике  $p$ -типа 5, заряжая его положительно. Таким образом, между полупроводниками  $p$ - и  $n$ -типов образуется разность потенциалов, или электродвижущая сила (ЭДС), которая обеспечивает протекание постоянного тока от положительной тыльной 6 к отрицательной лицевой 2 контактной площадке при подключении солнечного элемента во внешнюю сеть 7.

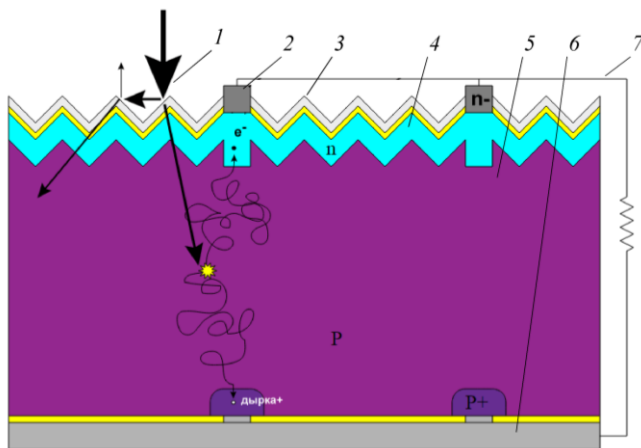


Рис. 2.3. Принцип работы солнечного элемента:

- 1 – солнечное излучение; 2 – лицевая контактная площадка;
- 3 – антиотражающее покрытие; 4 – слой полупроводника  $n$ -типа;
- 5 – кремниевая пластина (полупроводник  $p$ -типа);
- 6 – тыльная контактная площадка; 7 – внешняя сеть

Для создания слоя полупроводника  $n$ -типа поверхность кремниевой пластины подвергают диффузии (насыщению) атомами бора или фосфора. В процессе диффузии, выполняемой в специальных печах при температуре около  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на пластинах толщиной  $200\text{ }\mu\text{м}$  формируется слой  $n$ -типа, проникающий на глубину всего  $0,5\text{ }\mu\text{м}$ , т. е.  $p$ - $n$  переход залегает у самой поверхности солнечного элемента. Это сделано для того, чтобы носители заряда различных знаков, сгенерированные под действием излучения, как можно скорее попадали в зону влияния  $p$ - $n$  перехода, иначе они вновь встретятся друг с другом и самокомпенсируются, не внося никакого вклада в генерацию электрического тока.

На рабочую поверхность солнечных элементов наносится антиотражающее покрытие 3 (см. рис. 2.3), уменьшающее отражение с 11 до 1–2 %.

Лицевая поверхность элементов служит для максимального поглощения излучения, падающего на нее. По этой причине контакт, расположенный на этой стороне солнечного элемента, выполняется в виде решетки, обычно состоящей из двух-трех широких контактных площадок и нескольких десятков тонких токособирающих линий, расположенных перпендикулярно к широким (рис. 2.4). Контактная решетка выполняется методом трафаретной печати серебросодержащими пастами.

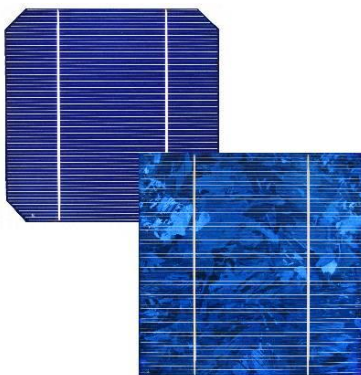


Рис. 2.4. Лицевая металлизация солнечного элемента

Важным моментом при нанесении лицевой металлизации является то, что  $p$ - $n$  переход залегает на глубине около 0,5 мкм и металл серебряной пасты должен надежно войти в  $n$ -слой кремния, но при этом не достичь  $p$ -слоя, иначе будет иметь место электрический контакт между двумя типами полупроводника и солнечный элемент окажется короткозамкнутым.

На тыльную поверхность солнечного элемента наносится два типа металла: сплошной слой алюминия и точечная серебряная металлизация, выполняющая функцию контакта.

После нанесения каждого слоя пасты солнечный элемент сушат в специальных печах, а после нанесения всех трех слоев (один на лицевой и два на тыльной стороне) он отправляется на завершающий обжиг.

Кроме рассмотренных выше кристаллических кремниевых элементов в последнее время активно развивается производство тонкопленочных солнечных элементов, в составе которых содержится всего около 1 % кремния по отношению к массе подложки. Из-за меньшего расхода материалов на поглощающий слой такие элементы дешевле в производстве, но пока имеют меньшую эффективность (менее 20 %) и неустранимую деградацию характеристик во времени.

Мировой рекорд эффективности прямого преобразования солнечной энергии в электрическую принадлежит французским компаниям Soitec и CEA-Leti, чей многослойный солнечный элемент обеспечил 46 % КПД.

**Солнечные батареи** состоят из набора солнечных элементов (фотоэлектрических преобразователей), которые непосредственно преобразуют солнечную энергию в электрическую. Установка нескольких солнечных батарей на одно основание называется солнечной панелью (рис. 2.5).

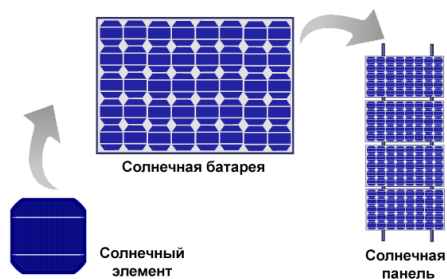


Рис. 2.5. Структура солнечной генерации

В составе батареи солнечные элементы соединяются последовательно и параллельно. При последовательном соединении элементов увеличивается выходное напряжение, при параллельном – ток. Для получения солнечной батареи с требуемыми параметрами тока и напряжения комбинируют оба способа соединения (рис. 2.6).

Номинальные значения напряжения ( $U_{SB}$ , В) и силы электрического тока ( $I_{SB}$ , А) солнечной батареи определяются формулами:

$$U_{SB} = n \cdot U_{PE} ; \quad (2.1)$$

$$I_{SB} = m \cdot I_{PE} , \quad (2.2)$$

где  $U_{PE}$  – номинальное напряжение солнечного элемента, В;  
 $I_{PE}$  – номинальная сила тока солнечного элемента, А;  
 $n$  – количество последовательно соединенных солнечных элементов в одной цепочке;  
 $m$  – количество параллельно соединенных цепочек.

Электрическая мощность ( $P_{SB}$ , Вт) солнечной батареи определяется по следующей формуле:

$$P_{SB} = U_{SB} I_{SB} \cdot \quad (2.3)$$

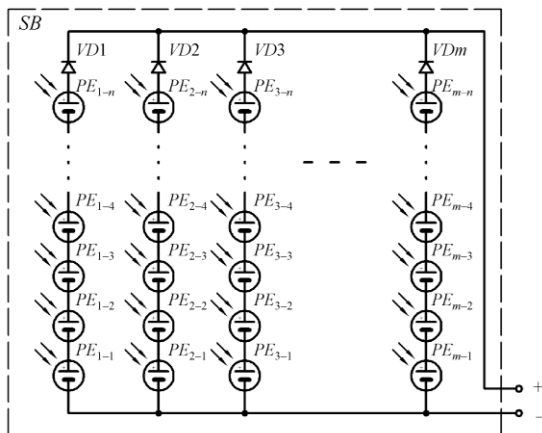


Рис. 2.6. Электрическая схема солнечной батареи

При затенении поверхности батареи солнечные элементы прекращают вырабатывать электрический ток и превращаются в его потребители. Они потребляют энергию из внешней сети, например, накопленную в аккумуляторе, что приводит к их перегреву и выходу из строя. Для предотвращения этого цепочки солнечных элементов шунтируются диодами  $VD1 \dots VDm$  (см. рис. 2.6), которые допускают протекание электрического тока только в одном направлении.

Конструкция солнечной батареи (рис. 2.7) должна обеспечивать уменьшение световой деградации элементов, эффективное использование света и механическую прочность. Первое достигается применением специального стекла, поглощающего ту часть спектра солнечного света, которая заведомо не будет преобразована в

электричество и лишь негативно повлияет на срок службы элементов. Поверх закаленного стекла наносится пленка ЭВА (этиленвинилацетатная пленка), уменьшающая светопреломление и боковое отражение.

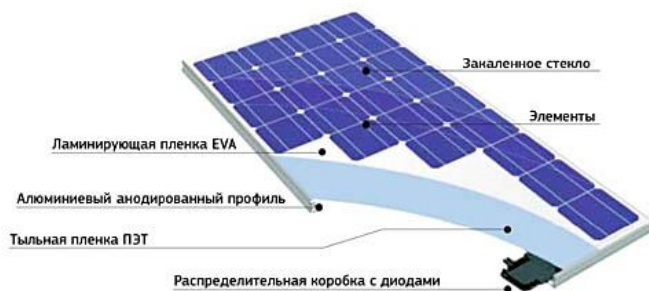


Рис. 2.7. Конструкция солнечной батареи

Солнечные элементы, стекло, пленка ЭВА укладываются на ПЭТ-подкладку и соединяются в единый «пирог» без воздушных зазоров, который помещается в металлический корпус, служащий также теплопроводом. Корпус тщательно герметизируется.

Особенностью солнечных батарей является то, что на эффективность их работы влияют место установки, время суток, пора года, погода и т. п. Поэтому для корректного сравнения различных моделей между собой необходимо стандартизировать условия измерения их параметров.

Солнечное излучение характеризуется удельной мощностью на единицу площади поверхности. Этот параметр отличается в различных регионах Земли, причем максимальная мощность солнечного излучения на нашей планете превышает  $1300 \text{ Вт/м}^2$ , но для удобства за стандартное значение для солнечных батарей принято  $1000 \text{ Вт/м}^2$ .

Другим важным параметром является распределение солнечного излучения по длинам волн, т. е. спектральный состав света. Для его характеристики введено понятие «воздушная масса»  $AM$  (*Air Mass*). Спектральный состав излучения с воздушной массой  $AM 0$  соответствует спектру солнечного света за пределами атмосферы Земли;  $AM 1$  – излучению на поверхности Земли при условии, что Солнце находится строго над точкой наблюдения и лучи света проходят сквозь атмосферу планеты по кратчайшему пути. Для солнечных

батарея стандартом является  $AM\ 1,5$ , соответствующий солнечному излучению, прошедшему через 1,5 атмосферы Земли.

Значительное влияние на работу солнечных батарей оказывает температура, увеличение которой на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  снижает эффективность генерации электроэнергии на 0,5 %. Обычно характеристики батарей задаются для температуры  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Стандартные условия, в которых обеспечиваются заявленные технические характеристики солнечных батарей, обозначаются аббревиатурой *STC* (*Standard Test Conditions*) и указываются в следующем виде: *STC*:  $1000\text{ W/m}^2$ ;  $AM\ 1,5$ ;  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Технические характеристики солнечных батарей включают следующие параметры:

- номинальная мощность, Вт;
- номинальное напряжение, В;
- номинальная сила тока, А;
- напряжение холостого хода (максимальное напряжение), В;
- сила тока короткого замыкания (максимальная сила тока), А;
- рабочий диапазон температур,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- масса, кг;
- размеры, мм;
- стандартные условия (*STC*).

Солнечные батареи выпускаются следующих кондиций: *Grade A*, *Grade B*, *Grade C* и *Ungrade* (некондиция). В зависимости от кондиции мощность солнечной батареи к концу срока службы падает на величину: до 5 %, 5–30 % и свыше 30 % соответственно. Срок службы солнечных батарей не регламентирован стандартом, поэтому производители устанавливают его по своему усмотрению: 5, 10, 15 и 25 лет.

### **Методика выполнения работы**

1. Ознакомиться с конструкцией и техническими характеристиками солнечной батареи, определить тип фотоэлементов.

2. Согласно выбранного варианта (табл. 2.1), записать полученные параметры в таблицу 1.3 и провести расчет.

3. Полученные расчетные значения записать в табл. 2.2.

Таблица 2.1. Данные для расчетов

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{SB, A}$ (холостой ход)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$I_{SB, A}$ (1 включен)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$I_{SB, A}$ (2 включены)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
$I_{SB, A}$ (3 включены)	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$I_{SB, A}$ (все включены)	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$\overline{E}_v$ , лк, средняя освещенность	15 000	16 000	17 000	18 000	19 000	20 000	21 000	22 000	23 000	24 000

Световой поток (лм)

$$\Phi_v = \overline{E}_v ab, \quad (2.4)$$

где  $\overline{E}_v$  – средняя освещенность солнечной батареи, лк;

$a, b$  – длина и ширина солнечной батареи, ( $a=1,2$  м,  $b=0,8$  м).

Мощность световой энергии (Вт)

$$Q_v = \frac{\Phi_v}{K_v}, \quad (2.5)$$

где  $K_v$  – коэффициент световой эффективности излучения, равный 683 лм/Вт.

Электрическая мощность (Вт) солнечной батареи

$$P_{SB} = U_{SB} I_{SB}. \quad (2.6)$$

Коэффициент преобразования световой энергии в электрическую

$$\eta_{SB} = \frac{P_{SB}}{Q_v}. \quad (2.7)$$

5. Занести результаты измерений и расчетов в табл. 2.2., построить графические зависимости  $U_{SB}(I_{SB})$  и  $\eta_{SB}(P_{SB})$ .

Таблица 2.2. Результаты измерений и расчетов

Нагрузка	$U_{SB}$ , В	$I_{SB}$ , А	$P_{SB}$ , Вт	$\eta_{SB}$	$\overline{E}_v$ , лк	$\Phi_v$ , лм	$Q_v$ , Вт
Холостой ход (все выключатели отключены)	40						
$\frac{1}{4}$ (1 включен)	40						
$\frac{1}{2}$ (2 включены)	40						
$\frac{3}{4}$ (3 включены)	39,5						
Полная (4 выключателя включены)	39						

### Содержание отчета

1. Цель работы;
2. Электрическая схема солнечной батареи (рис. 2.6.);
3. Технические характеристики солнечных батарей;
4. Расчетные формулы;
5. Результаты расчетов (табл. 2.2).

### Контрольные вопросы

1. Назовите основные отличия монокристаллического и поликристаллического солнечных элементов.
2. Что такое текстурирование поверхности солнечного элемента? С какой целью оно выполняется?
3. Каким образом происходит генерация электрической энергии в солнечном элементе?
4. Когда элементы в солнечной батарее соединяют последовательно и когда – параллельно?
5. С какой целью в солнечных батареях устанавливаются диоды?
6. Влияет ли температура солнечной батареи на ее КПД?