

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Строительства,  
энергетики и транспорта

## **Методические указания к проведению практических занятий и выполнению контрольных работ**

**по дисциплине:**

**Б1.О.30 «Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой  
энергетики»**

для направления подготовки (специальности) 13.03.02

«Электроэнергетика и электротехника»

Форма обучения: очная, заочная

Мурманск  
2021

Составитель - Пантилеев С. П. доцент кафедры «Энергетики и транспорта»

Рецензент – Малышев В.С., профессор кафедры «Энергетики и транспорта».

В методических указаниях излагаются вопросы, связанные с использованием нетрадиционных и возобновляемых источников энергии: солнечных систем теплоснабжения, с расчётами ветродвигательных установок, с расчётами аккумуляторов энергии и тепла, получаемых от возобновляемых источников энергии. Рассматриваются классификация и выбор коллекторов солнечной энергии, общие положения расчета солнечных систем горячего водоснабжения. Особое внимание уделяется методике расчета коэффициента замещения солнечной энергии.

В процессе выполнения контрольных заданий у студентов формируются следующие, предусмотренные Федеральным государственным образовательным стандартом, компетенций:

ПК-9: Способностью обеспечивать соблюдение экологической безопасности на производстве и планировать экозащитные мероприятия и мероприятия по энерго- и ресурсосбережению на производстве.

ПК-10: Готовностью к участию в работах по освоению и доводке технологических процессов.

Каждое практическое задание заканчивается контрольными вопросами, на которые обучающиеся должны письменно ответить в рабочих тетрадях для практических занятий.

В МУ приведены задания на две контрольные работы по вариантам, даны пояснения для решения задач и приведён список литературы для самостоятельного изучения данной дисциплины.

МУ предназначены для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

## **1. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ**

### **1.1 Практическое занятие 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ**

#### **1.1.1 Общие сведения**

Система отопления здания с использованием солнечного излучения, в которой в качестве коллектора солнечной энергии и аккумулятора теплоты служат в основном ограждающие конструкции самого здания, а циркуляция воздуха в помещениях осуществляется путем конвекции естественной.

От пассивной системы солнечного отопления требуется обеспечение теплового комфорта и регулирование температурного режима в помещениях. При этом тепловой комфорт достигается при более низкой температуре воздуха по сравнению с обычными зданиями, так как температура большинства внутренних ограждений выше температуры воздуха.

Для отопления зданий используются **следующие типы пассивной системы солнечного отопления** (рисунок 1.1):

- система прямого улавливания солнечного излучения, поступающего через остекленные поверхности окон большой площади на южном фасаде здания;

- система улавливания солнечного излучения, проникающего через поверхности солнечной теплицы, примыкающей к южной стене здания;

- система с остекленной теплоаккумулирующей стеной (стеной Тромба);

- система с контуром конвективной циркуляции воздуха и галечным аккумулятором теплоты.

**Пассивная система прямого улавливания солнечного излучения эффективно работает при соблюдении следующих условий:**

- ориентация дома вдоль оси восток-запад (отклонение от нее не более 30°);

- площадь окон на южной стороне дома - и не менее 50...70% всей площади остекления, на северной - и не более 10% в условиях холодного климата, причем южные окна снабжены двухслойным, а северные - и трехслойным остеклением;

- улучшенная теплоизоляция стен, пола, потолка здания, а теплопотери из-за нерегулируемого поступления наружного воздуха сведены к минимуму;

- достаточная теплоаккумулирующая способность внутренних стен и пола, предназначенная для поглощения и аккумуляирования теплоты солнечного излучения;

- над окнами для предотвращения перегревания помещений в летнее время предусмотрены навесы, козырьки и т.п.

КПД пассивной системы солнечного отопления от 25 до 30%, а в особо благоприятных климатических условиях может достигать 60...75%.

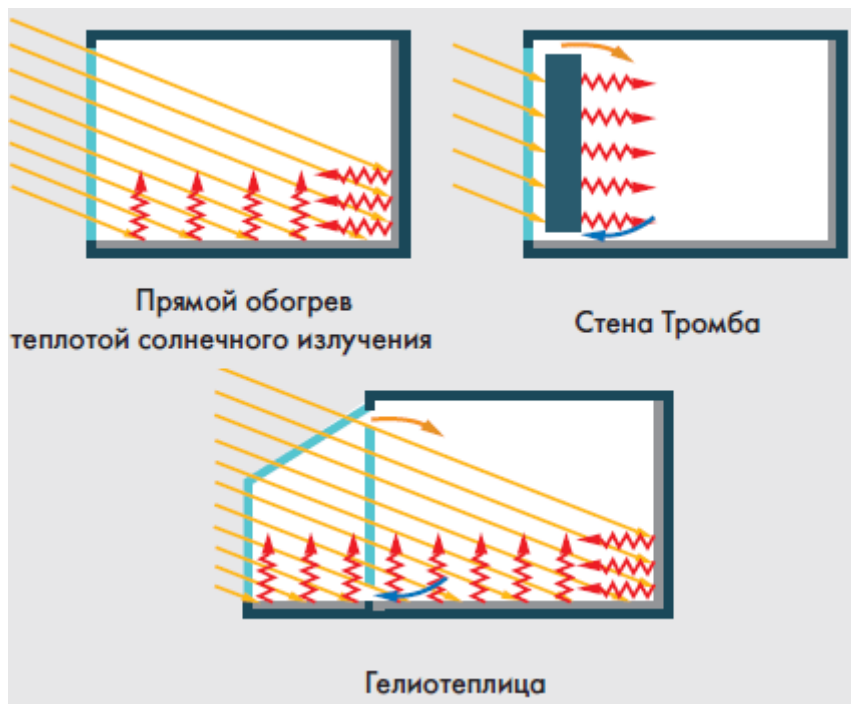


Рисунок 1.1 Типы пассивной системы солнечного отопления

**Недостаток системы:** значительные суточные колебания температуры воздуха в помещениях из-за тепловой инерции их теплоаккумулирующих элементов.

При рациональном проектировании обеспечиваются **оптимальная масса теплоаккумулирующих элементов** и наилучшее расположение каждого из них. Эффективность прямого улавливания солнечного излучения повышается при теплоизоляции светопрозрачных поверхностей в ночное время, автоматическом управлении заслонками для регулирования поступления и удаления воздуха, форточками и фрамугами и т.п.

Наряду с отоплением обеспечивается эффективное использование дневного освещения, благодаря чему снижается потребление элетроэнергии.

**В системе с солнечной теплицей** (зимним садом, солярием или оранжереей), примыкающей к южной стене здания, солнечное излучение используется как для отопления здания, так и для выращивания растений. Общий КПД такой системы повышается до 60...75%, однако в здание поступает всего лишь 10...30% количества излучения, падающего на остекление теплицы. При этом следует применять 2- и 3-слойное остекление теплицы в сочетании с окнами в примыкающей стене здания. Площадь остекления теплицы должна быть в 1,5..3 раза больше площади окон жилого дома. **В солнечной теплице предусматривается аккумулятирование теплоты в бетонной плите или емкости с водой.** Пол делается темным для усиленного поглощения солнечного излучения, 15...25% его площади может быть занято растениями, Температура воздуха в оранжерее не должна превышать 20...25°C зимой и 25...28°C летом, а при понижении температуры до 7...13°C необходимо включать дополнительное отопление.

Для улучшения распределения теплоты в помещении в стене предусматривается несколько отверстий, чтобы **обеспечить циркуляцию воздуха с расходом не менее 0,1м/с.**

**Пассивные системы солнечного отопления с остекленной южной теплоаккумулирующей стеной высокоэффективны.** Проникающее через одно- или двухслойное остекление солнечное излучение поглощается поверхностью стены, покрашенной темной матовой краской, и аккумулируется ее массой. Аккумулированная стеной теплота передается внутрь помещений. КПД этой системы достигает 35%. Целесообразна **конструкция стены с отверстиями внизу и вверху** для циркуляции воздуха. Движение воздуха регулируется поворотными заслонками. Для усиления циркуляции воздуха может использоваться вентилятор. У стены могут быть установлены одна над другой бочки с водой, что увеличивает аккумуляцию теплоты.

Возможны системы с нулевым потреблением теплоты и холода, где соответствующие параметры воздуха в помещениях обеспечиваются без дополнительных энергозатрат за счет:

необходимой тепловой изоляции;

выбора конструкционных материалов здания с соответствующими теплохладоаккумулирующими свойствами;

использования в системе дополнительных теплохладоаккумуляторов с соответствующими характеристиками.

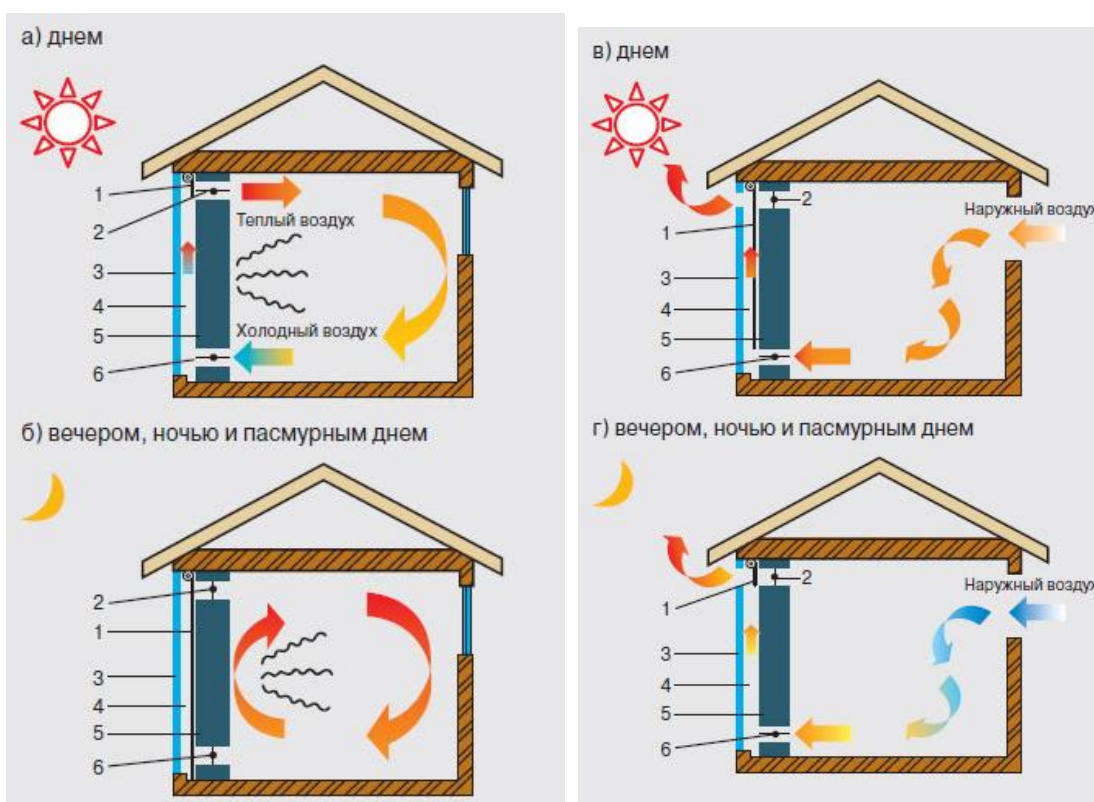
На рисунке 1.2 представлена усовершенствованная схема работы пассивной системы теплоснабжения здания с дополнительными элементами (шторы, клапаны), позволяющими более точно регулировать температуру воздуха внутри помещения.

Фото



*Рисунок 1.2. Дополнительные элементы системы теплоснабжения здания.*

На южной стороне здания устанавливается так называемая **стена Тромба**, которая состоит из массивной стены (бетонной, кирпичной или каменной) и стеклянной перегородки, устанавливаемой на небольшом расстоянии от стены с внешней стороны. Наружная поверхность массивной стены окрашена в темный цвет. Через стеклянную перегородку нагревается массивная стена и воздух, находящийся между стеклянной перегородкой и массивной стеной. Нагретая массивная стена за счет излучения и конвективного теплообмена передает накопленную теплоту в помещение. Таким образом, в этой конструкции **совмещаются функции коллектора и аккумулятора теплоты**.



*Рисунок 1.3. Схемы работы усовершенствованной пассивной солнечной системы теплоснабжения: а, б – зимой; в, г – летом; 1– штора; 2– верхний клапан; 3– стеклянная перегородка; 4 – прослойка; 5 – массивная стена; 6 – нижний клапан*

Воздух, находящийся в прослойке между стеклянной перегородкой и стеной, в холодный период времени и в солнечный день используется в качестве теплоносителя для подачи теплоты в помещение. Для предотвращения теплооттоков в окружающую среду в холодный период времени в ночное время и избыточных теплопритоков в солнечные дни теплого периода времени используются шторы, которые значительно сокращают теплообмен между массивной стеной и внешней окружающей средой.

Шторы выполняются из нетканых материалов с серебристым покрытием. Для обеспечения необходимой циркуляции воздуха используются воздушные клапаны, которые расположены в верхней и нижней частях массивной стены. Автоматическое управление работой воздушных клапанов позволяет поддерживать необходимые теплопритоки или теплооттоки в обслуживаемом помещении.

**Система пассивного солнечного теплоснабжения работает следующим образом:**

**1. В холодный период времени (отопление):**

**солнечный день** – штора поднята, клапаны открыты (рисунок 3а). Это приводит к нагреву массивной стены через стеклянную перегородку и нагреву воздуха, находящегося в прослойке между стеклянной перегородкой и стеной. Теплота поступает в помещение от нагретой стены и нагретого в прослойке воздуха, циркулирующего через прослойку и помещение под воздействием гравитационных сил, вызванных разностью плотностей воздуха при разных температурах (естественная циркуляция);

**ночь, вечер или пасмурный день** – штора опущена, клапаны закрыты (рисунок 3б). Теплооттоки во внешнюю среду значительно сокращаются. Температура в помещении поддерживается за счет поступления теплоты от массивной стены, накопившей эту теплоту от солнечного излучения;

**2. В теплый период времени (охлаждение):**

**солнечный день** – штора опущена, нижние клапаны открыты, верхние – закрыты (рисунок 3в). Штора предохраняет нагрев массивной стены от солнечного излучения. Наружный воздух поступает в помещение с затененной стороны дома и выходит через прослойку между стеклянной перегородкой и стеной в окружающую среду;

**ночь, вечер или пасмурный день** – штора поднята, нижние клапаны открыты, верхние – закрыты (рис. 3г). Наружный воздух поступает в помещение с противоположной стороны дома и выходит в окружающую среду через прослойку между стеклянной перегородкой и массивной стеной. Стена охлаждается в результате конвективного теплообмена с воздухом, проходящим через прослойку, и за счет оттока теплоты излучением в окружающую среду. Охлажденная стена в дневное время поддерживает необходимый температурный режим в помещении.

**Для расчета систем пассивного солнечного отопления зданий разработаны математические модели нестационарного теплопереноса при естественной конвекции** для обеспечения помещений необходимыми температурными условиями в зависимости от теплофизических свойств ограждающих конструкций, суточного изменения солнечного излучения и температуры наружного воздуха.

**Анализ пассивных солнечных систем теплоснабжения** показывает, что они являются достаточно перспективными в отдельных климатических регионах в сравнении с остальными системами по следующим причинам:

- дешевизна;
- простота обслуживания;
- надежность.

**К недостаткам пассивных солнечных систем отопления** следует отнести то, что параметры воздуха внутри помещения могут отличаться от требуемых (расчетных) при изменении температуры наружного воздуха за пределами, принятыми в расчетах.

Для достижения хорошего энергосберегающего эффекта в системах теплоснабжения зданий с более точным поддержанием температурных условий в заданных пределах целесообразно комбинированное использование пассивных и активных солнечных систем теплоснабжения.

### **1.1.2 Расчет солнечных установок**

#### **Общая информация**

Как правило, в доме с пассивным солнечным отоплением одновременно используется несколько типов солнечных систем, например, пристроенная к южному фасаду здания солнечная теплица (оранжерея, зимний сад), южная остекленная теплоаккумулирующая стена Тромба и солнцезащитные окна южной ориентации.

При разработке технического задания и эскизном проектировании системы пассивного солнечного отопления учитываются самые общие ограничения, налагаемые на систему следующими факторами:

- географическое местоположение здания;
- назначение здания;
- размеры здания;
- допустимая стоимость;
- располагаемые или необходимые материалы.

#### **Последовательность работ:**

1. Эскизная проработка нескольких вариантов системы солнечного отопления, заканчивающаяся выбором предпочтительного варианта.
2. Разработка детального проекта и принятие решения относительно:
  - расположения комнат;
  - размеров комнат;
  - ориентации здания;
  - выбора материалов;
  - уточнения всех размеров.



(В результате выполнения этой второй стадии проектирования получается вполне конкретная конструктивная разработка здания. Иногда на этой стадии разрабатываются конкурирующие варианты, например отличающиеся различными архитектурно-планировочными решениями или используемыми строительными материалами, с учетом экономических и теплотехнических факторов. Это та стадия проектирования, на которой принимаются все основные архитектурные и инженерные решения).

Выполнение рабочих чертежей со всеми необходимыми деталями с указанием размеров, материалов, т.е. со всем, что требуется для осуществления строительства здания с системой пассивного солнечного отопления.

Относительная площадь солнцезащитных поверхностей в различных климатических зонах может составлять 10...100% площади отапливаемых помещений. При этом за счет использования солнечной энергии обеспечивается обычно определенная доля  $f$  (10...80%) тепловой нагрузки отопления и соответственно уменьшается расход теплоты от топливного источника. В случае **использования подвижной тепловой изоляции**, закрывающей в ночное время лучепрозрачные поверхности, теплотери здания значительно снижаются и эффективность солнечной системы возрастает в 1,5...2,5 раза.

При расчете систем пассивного солнечного отопления **необходимо определить площадь светопрозрачных поверхностей наружных ограждений здания**, используемых для улавливания солнечной энергии, и массу теплоаккумулирующих элементов пола, стен, потолка.

Как правило, эти элементы выполняются из бетона, но для аккумуляирования теплоты могут также использоваться емкости, заполненные водой. При этом **удельные масса  $m_{ак}$  и объем  $V_{ак}$**  теплоаккумулирующих элементов, отнесенные к  $1\text{ м}^2$  площади остекленных поверхностей, ориентированных на юг, определяются в зависимости от доли  $f$  (%) солнечной энергии в покрытии тепловой нагрузки отопления как:

$$m_{ак} = C \cdot f; V_{ак} = C_{об} \cdot f.$$

Значения коэффициентов определяются видом теплоаккумулирующего элемента.

Так, для емкости с водой:

$$C = 3\text{ кг}/(\% \cdot \text{м}^2); C_{об} = 0,003\text{ м}^3/(\% \cdot \text{м}^2).$$

для бетонной или каменной стены (пола):

$$C = 15\text{ кг}/(\% \cdot \text{м}^2); C_{об} = 0,075\text{ м}^3/(\% \cdot \text{м}^2).$$

Следует отметить, что **величина  $f$  практически соответствует процентному снижению расхода теплоты от обычного топливного источника**. Так, например, если требуется снизить теплотребление дома на 40%, что соответствует значению  $f = 40\%$ , необходимые масса и объем:

для водяного аккумулятора теплоты составят:

$$m_{\text{ак}} = 120 \text{ кг/м}^2; V_{\text{ак}} = 0,12 \text{ м}^3/\text{м}^2.$$

для бетонной стены (пола):

$$m_{\text{ак}} = 600 \text{ кг/м}^2; V_{\text{ак}} = 0,3 \text{ м}^3/\text{м}^2.$$

При  $f = 10 \dots 80\%$  удельный объем  $V_{\text{ак}}$ , отнесенный к  $1 \text{ м}^2$  площади солнцезащитных поверхностей южного фасада, равен:

для емкостей с водой:

$$V_{\text{ак}} = 0,03 \dots 0,24 \text{ м}^3/\text{м}^2.$$

для бетонной стены (пола):

$$V_{\text{ак}} = 0,08 \dots 0,6 \text{ м}^3/\text{м}^2.$$

### **ПРИМЕР**

Рассмотрим пример оценки массы теплоаккумулирующих элементов дома жилой площадью  $F_{\text{ж}} = 120 \text{ м}^2$  при условии, что требуется снизить теплопотребление за счет солнечной энергии на  $60\%$  и что площадь светопрозрачных поверхностей, улавливающих солнечную энергию, равна  $F_{\text{св}} = 40 \text{ м}^2$ . Аккумуляция теплоты осуществляется в бетонном полу. В соответствии с приведенными выше данными необходимый удельный объем теплоаккумулирующего бетонного пола составит:

$$V_{\text{ак}} = C_{\text{об}} \cdot f = 0,0075 \cdot 60 = 0,45 \text{ м}^3/\text{м}^2.$$

всего требуется бетона:

$$V_{\text{бет}} = F_{\text{св}} V_{\text{ак}} = 40 \cdot 0,45 = 18 \text{ м}^3.$$

Это означает, что пол должен иметь толщину:

$$\delta_{\text{бет}} = V_{\text{бет}} / F_{\text{ж}} = 18 / 120 = 0,15 \text{ м}.$$

Необходимым условием эффективного функционирования пассивной системы солнечного отопления является рациональное размещение теплоаккумулирующего элемента, обеспечивающее его облучение Солнцем в течение как минимум 4ч в день. Для этого он должен быть размещен непосредственно вблизи остекления.

Как должно быть ориентировано здание с пассивным использованием солнечного излучения для отопления?

Наилучшая ориентация здания - южная, однако допускается отклонение фасада здания до  $30^\circ$  к востоку или западу.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите типы пассивной системы солнечного отопления.
2. Опишите систему с остекленной теплоаккумулирующей стеной (стеной Тромба).
3. Какой должна быть площадь остекления теплицы?

4. Каково назначение солнечного аккумулятора?
5. Достоинства системы отопления с галечным аккумулятором теплоты.
6. Как работает система пассивного солнечного теплоснабжения в течении суток?
7. Какая доля топливного теплоснабжения обычно обеспечивается за счет использования солнечной энергии?

### **Задание**

Для условий выше приведённого примера рассчитать объём стены в виде водяного аквариума с тёмной северной стенкой.

## **1.2 Практическое занятие 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ**

### **1.2.1 Солнечное теплоснабжение**

Солнечное теплоснабжение – способ отопления жилого дома, который с каждым днем становится все более популярным во многих, в основном развитых, государствах мира. Наибольшими успехами в области солнечной тепловой энергетики на сегодняшний день могут похвастаться в странах западной и центральной Европы. На территории Евросоюза на протяжении последнего десятилетия наблюдается ежегодный рост отрасли возобновляемой энергетики на 10...12%. Такой уровень развития – это очень существенный показатель.

Одна из наиболее очевидных областей применения солнечной энергетики – это ее использование в целях подогрева воды и воздуха (как теплоносителей). В климатических областях, где преобладает холодная погода, для комфортного проживания людей обязательны расчет и организация систем отопления каждого жилого дома. В них должно присутствовать горячее водоснабжение для различных нужд, к тому же дома необходимо отапливать. Конечно, лучшим вариантом здесь будет применение схемы, где работают автоматизированные системы теплоснабжения.

Больших объемов ежедневного поступления горячей воды в процессе производства требуют промышленные предприятия. В качестве примера можно привести Австралию, где на подогрев жидкого теплоносителя до температуры, не превышающей 100°C, затрачивается практически 20 процентов всей расходуемой энергии. По этой причине в части развитых стран запада, а в большей мере в Израиле, Северной Америке, Японии и, конечно же, в Австралии, очень быстро происходит расширение производства солнечных отопительных систем.

### **1.2.2 Выбор схемы применения оборудования, пассивные и активные системы**

Существует две схемы использования солнечного излучения в качестве системы отопления для дома. Это активные и пассивные системы. Пассивные системы отопления на солнечной радиации – те, в которых элементом, непосредственно абсорбирующим солнечную радиацию и образующим из нее теплоту, служит сама конструкция дома либо его отдельные части (практическое занятие 1). Этими элементами могут служить забор, кровля, отдельные части здания, построенные на основе определенной схемы. В пассивных системах не используются механические движущиеся части.

### **Активная система теплоснабжения**

Активные системы работают на основе противоположной схемы отопления дома, в них активно используются механические устройства (насосы, двигатели, при их использовании также производят расчет необходимой мощности). Наиболее простыми по своей конструкции и менее затратными в финансовом плане при монтаже схемы являются системы пассивного действия. Такие схемы отопления не нуждаются в установке дополнительных устройств для абсорбции и последующего распределения солнечного излучения в системе отопления дома. Работа таких систем основана на принципе прямого обогрева жилого помещения прямо через пропускающие свет стены, расположенные на южной стороне. Дополнительную функцию обогрева осуществляют внешние поверхности элементов ограждения дома, которые оборудуются слоем прозрачных экранов.

Для запуска процесса преобразования солнечной радиации в тепловую энергию применяют систему конструкций, основанную на использовании гелиоприёмников с прозрачной поверхностью, где основную функцию играет «парниковый эффект», используются возможности стекла удерживать тепловое излучение, благодаря чему и повышают температуру внутри помещения. Стоит отметить, что применение только одного из видов систем может быть не совсем оправдано. Зачастую тщательный расчет показывает, что добиться значительного снижения потерь тепла и уменьшения потребностей здания в энергии можно путем **применения интегрированных систем**. Общая работа и активной, и пассивной системы путем сочетания положительных качеств даст максимальный эффект.

### **Солнечное отопление**

Обычно проводимый расчет эффективности показывает, что пассивное использование излучения солнца обеспечит потребности вашего дома в отоплении приблизительно на 14...16 процентов. Такая система будет важной составляющей процесса получения тепла. Однако, невзирая на определенные положительные качества пассивных систем, основные возможности для **полного обеспечения потребностей здания в тепле все-таки необходимо применение активного отопительного оборудования**.

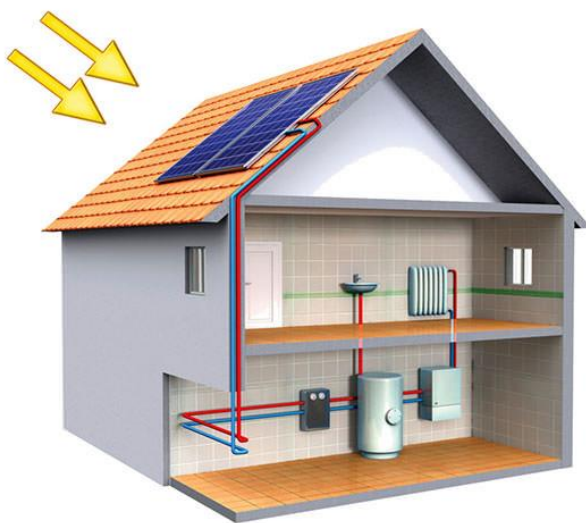
**Системы, функцией которых является непосредственно поглощение, аккумуляция и распределение солнечной радиации.**  
**Планирование и расчет**

Произвести расчет возможности монтажа активных отопительных систем, использующих солнечную энергию (кристаллические солнечные фотоэлементы, солнечные коллекторы), желательно на стадии проектирования здания. Но все же этот момент не носит обязательного характера, установка такой системы возможна и на уже существующее

задание независимо от года его постройки (основа для успеха – правильный расчет всей схемы).

### **Солнечные элементы на крыше**

Монтаж оборудования осуществляют на южную сторону дома (рисунок 2.1). Такое расположение создает условия для максимального поглощения поступающей солнечной радиации зимой. Фотоэлементы, преобразующие энергию солнца и установленные на неподвижную конструкцию, наиболее эффективны при их монтаже относительно поверхности земли **под углом равным географической локации отапливаемого здания**. Угол наклона крыши, градус поворота дома к югу – это значимые моменты, которые в обязательном порядке надо учитывать, производя расчет всей схемы отопления.



*Рисунок 2.1. Солнечные элементы на крыше*

**Солнечные фотоэлементы и коллекторы** на солнечном излучении необходимо устанавливать максимально близко к месту энергопотребления. Помните, что чем ближе вы постройте ванную и кухню, тем меньше будут потери тепла (в таком варианте можно обойтись и одним солнечным коллектором, который будет обогревать оба помещения). Основным критерием оценки при подборе необходимого вам оборудования является его коэффициент полезного действия.

**Отопительные солнечные системы активного действия, делятся на следующие группы по следующим критериям:**

- Применение дублирующего контура;
- Сезонность работы (на протяжении всего года или в определенный сезон);
- Функционального назначения – отопительные, снабжение горячей водой и комбинированные системы;
- Применяемый теплоноситель – жидкость или воздух;

Примененное техническое решение количества контуров (1, 2 или более).

Общие экономические данные будут служить основным фактором выбора в пользу одного из типов оборудования. Правильно определиться вам поможет грамотный тепловой расчет всей системы. Расчет необходимо выполнять, учитывая показатели каждого конкретного помещения, где намечена организация солнечного отопления и (или) горячего водоснабжения. Стоит учитывать месторасположение строения, климатические природные условия, размер стоимости вытесняемого энергетического ресурса. Правильный расчет и удачный выбор схемы организации теплоснабжения – залог экономической целесообразности применения оборудования солнечной энергетики.

### Солнечная система теплоснабжения

Самой распространенной из используемых схем отопления является установка солнечных коллекторов, в которых предусмотрена функция накопления абсорбированной энергии в специальной емкости – аккумуляторе.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили двухконтурные схемы отопления жилых помещений, в которых установлена принудительная система циркуляции теплоносителя в коллекторе (рисунок 2.2).

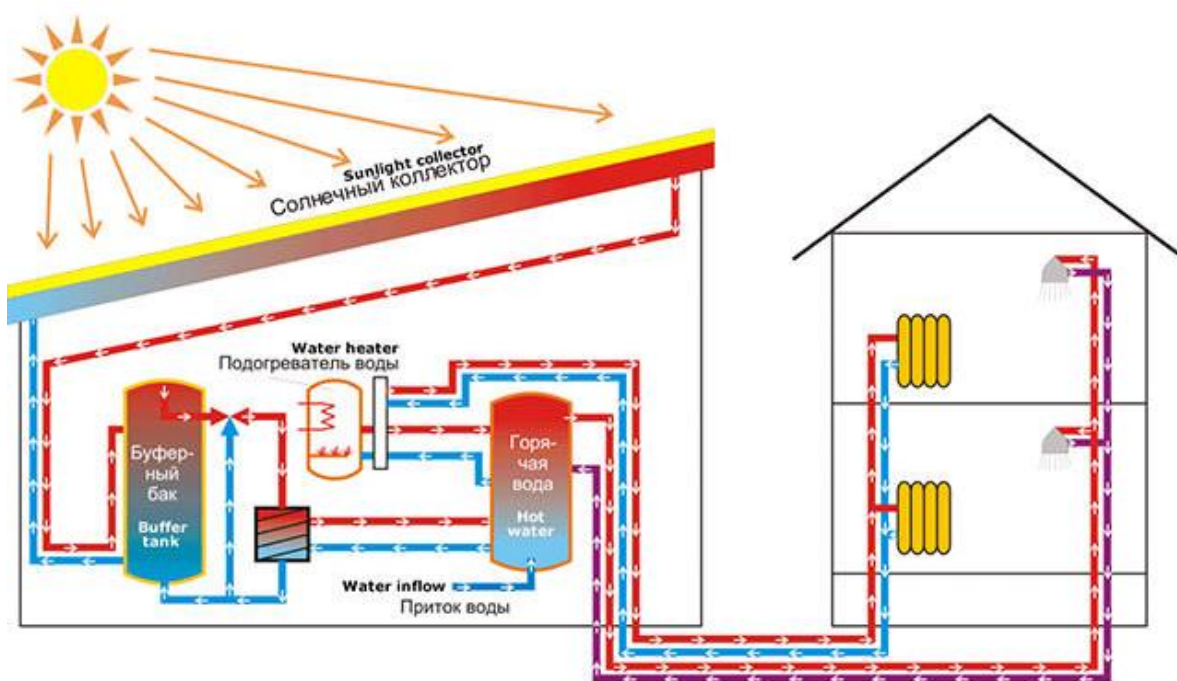


Рисунок 2.2. Солнечная система теплоснабжения

**Принцип его работы следующий.** Подача горячей воды осуществляется из верхней точки накопительного бака, процесс происходит автоматически согласно законам физики. Холодная проточная вода напором подается в нижнюю часть бака, эта вода вытесняет собирающуюся в верхней

части бака нагретую воду, которая далее поступает в систему горячего водоснабжения дома для удовлетворения его хозяйственных нужд и нужд отопления.

Для односемейного дома обычно устанавливают бак накопитель вместимостью от 400 до 800 литров. Для разогрева теплового носителя таких объемов в зависимости от природных условий требуется **правильно рассчитать площадь поверхности солнечного коллектора**. Также необходимо обосновать использование оборудования экономически.

#### **Стандартный набор оборудования для монтажа отопительной системы на солнечном излучении следующий:**

- Непосредственно сам солнечный коллектор;
- Крепежная система (опоры, балки, держатели);
- Накопительный бак;
- Бак компенсирующий избыточное расширение теплового носителя;
- Устройство контроля работы насоса;
- Насос (с комплектом клапанов); температурные датчики;
- Теплообменные устройства (применяют в схемах с большими объемами);
- Теплоизолированные трубы;
- Предохранительная и регулирующая арматура;
- Фитинги.

#### **Система на основе теплопоглощающих панелей.**

Такие панели, как правило, применяют на этапе нового строительства. Для их монтажа необходимо построить **специальную конструкцию, называемую горячей крышей**. Это означает, что панели необходимо смонтировать непосредственно в конструкцию крыши, при этом используя элементы кровли в качестве составных элементов корпуса оборудования.

Такая установка снизит ваши затраты на создание системы отопления, однако потребует высококачественной работы по гидроизоляции стыков устройств и кровли. Такой способ установки оборудования потребует от вас тщательного проектирования и планирования всех этапов работы. Надо решить много задач по разводке труб, размещению накопительного бака, установке насоса, регулировке уклонов. Достаточно много проблем при монтаже придется решить в случае, если здание не самым удачным образом повернуто к югу. В целом проект солнечных систем отопления будет отличным от других в той или иной степени. Неизменными останутся только базовые принципы системы. Поэтому привести точный перечень необходимых деталей для полного монтажа всей системы невозможно, так как в процессе установки может возникнуть необходимость применения дополнительных элементов и материалов





*Рисунок 2.3. Установка солнечных коллекторов*

### **1.2.3 Жидкостные отопительные системы**

В системах, работающих на основе жидкого теплоносителя, в качестве аккумулирующего вещества применяют обычную воду. Абсорбция энергии происходит в солнечных коллекторах плоской конструкции (рисунок 2.4).

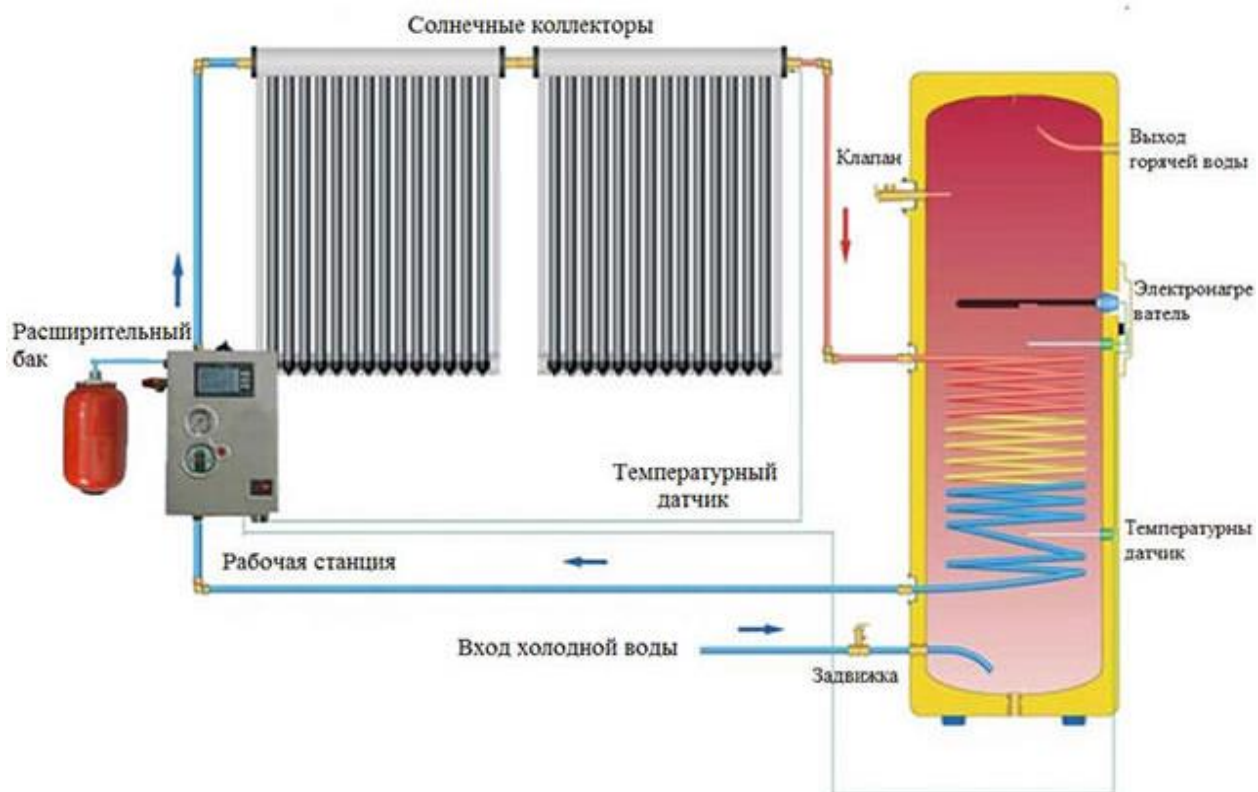


*Рисунок 2.4. Солнечный коллектор плоской конструкции*

Энергия аккумулируется в **баке накопителе** и расходуется по мере возникновения надобности.

Для передачи энергии от накопителя в здание применяют водо-водяной или водовоздушный теплообменник. Система горячего водообеспечения оборудована дополнительным баком, который называют **баком**

**предварительного нагрева.** Вода нагревается в нем за счет солнечного излучения и далее поступает в обычный водонагреватель.



*Рисунок 2.5. Система горячего водообеспечения*

### **Системы с принудительной и естественной циркуляцией**

К этой категории технологий можно отнести системы, работающие на основе естественной и принудительной циркуляции носителя энергии.

#### **Система с естественной циркуляцией**

Основа работы систем с естественной циркуляцией состоит в самостоятельном движении теплоносителя. Под воздействием повышающейся температуры он теряет плотность и поэтому стремится в верхнюю часть устройства. Возникающая разница в величине давлений и заставляет функционировать оборудование.

#### **Система с принудительной циркуляцией**

Оборудование с принудительной системой циркуляции (рисунок 2.6) включает в свою конструкцию маломощный насос, который контролирует циркуляцию теплоносителя по всему контуру. Работа такого насоса контролируется электроникой. Энергопотребление такого насоса незначительно в сравнении с объемами выработки тепла всей системой

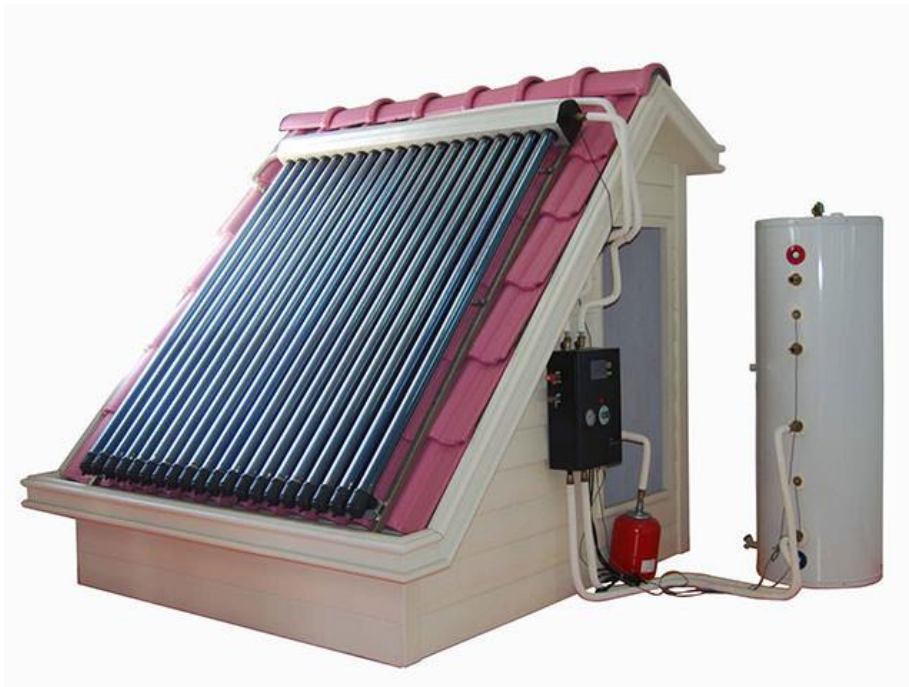


Рисунок 2.6. Система с принудительной циркуляцией

#### 1.2.4 Воздушная отопительная система

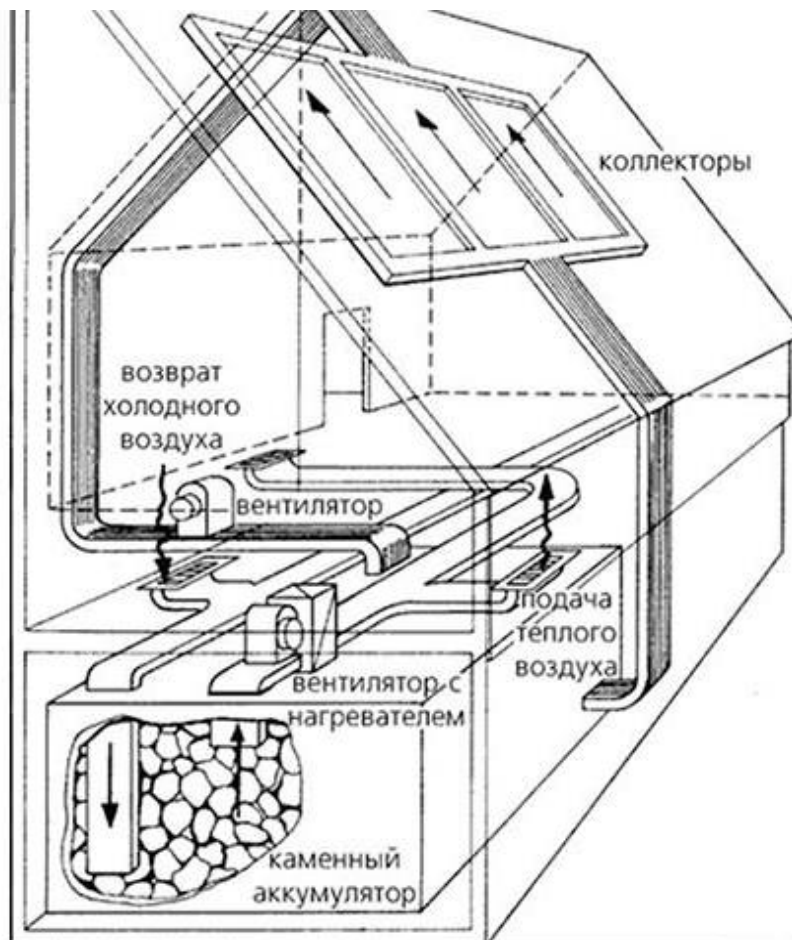


Рисунок 2.7. Воздушная система обогрева

Такая система в качестве носителя тепла использует воздух (рисунок 2.7). Разогревание теплоносителя осуществляется **в плоском солнечном коллекторе**, а далее нагретый воздух попадает в отапливаемое помещение либо в специальный накопительный прибор, где абсорбированная энергия накапливается в специальной насадке, которая обогревается поступающим горячим воздухом. Благодаря этой особенности система продолжает снабжать дом теплом даже ночью, когда солнечное излучение не доступно.

Солнечная энергия действительно уникальное явление, она не только является одной из основ жизни на земле, но также дарит всему живому свет и тепло, а для человека в современном мире способна служить еще и неисчерпаемым источником энергии. Недалека перспектива отказа человечества от использования ископаемого топлива (нефти, угля, газа) в пользу возобновляемых источников энергии. Одним из основных способов получения возобновляемого тепла и электричества в будущем будет преобразование солнечного излучения. Повсеместное внедрение в жизнь человека возобновляемой энергетики даст толчок развитию новых отраслей в науке и производстве и окажет значительное влияние на качество жизни на планете в сторону ее улучшения.

### 1.2.5 Приблизительный расчет солнечного коллектора

При использовании солнечных коллекторов (СК) в системе горячего водоснабжения необходимо правильно определить их количество или площадь: от этого зависит производительность. Расчет солнечного коллектора любого типа **базируется на потребностях, которые известны заранее**. В основном поставщики, предлагающие подобное оборудование, готовы не только установить, но и рассчитать необходимое количество СК, а также дать некоторые консультации. Конечно, можно полностью довериться фирме-установщику, а можно еще до обращения прикинуть самому, сколько же понадобится коллекторов для обеспечения себя горячей водой исходя из своих условий.

#### Расчет плоского солнечного коллектора

Практика показывает, что на квадратный метр поверхности, установленной перпендикулярно ярким солнечным лучам, приходится в среднем 900Вт тепловой энергии (при безоблачном небе). Расчет СК будем производить на основе модели площадью 1м<sup>2</sup>. Лицевая сторона – матовая, черная (обладает близким к 100% поглощением тепловой энергии). Тыльная сторона утеплена  $\delta=10\text{см}$  слоем пенополистирола.

Требуется рассчитать теплопотери, которые происходят на обратной, теневой стороне. Коэффициент теплоизоляции пенополистирола –  $\lambda=0,05\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ . Зная толщину и предположив, что разница температур на

противоположных сторонах материала – в пределах  $\Delta t=50^{\circ}\text{C}$ , высчитаем теплопотери:

$$Q=\lambda/(\delta\cdot\Delta t)=0,05/(0,1\cdot 50) = 25 \text{ Вт.}$$

Такие же приблизительно потери ожидаются со стороны торцов и труб, то есть суммарное количество составит 50Вт.

Безоблачным небо бывает редко, кроме того следует учитывать влияние налета грязи на коллекторе. Поэтому снизим количество тепловой энергии, приходящейся на  $1\text{ м}^2$ , до 800Вт. Вода, используемая в качестве теплоносителя в плоских СК, обладает теплоемкостью, равной  $c_{\text{в}}=4200\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ .

Определим количество нагреваемой воды на  $50^{\circ}\text{C}$  в течении часа от тепла с  $1\text{ м}^2$  площадь коллектора:

$$G= 800\cdot 3600/(4200\cdot 50)=13,7\text{кг/ч}$$

Округляем для удобства до 14кг/ч. Это выражение обозначает количество воды, которое можно нагреть на  $50^{\circ}\text{C}$  в коллекторе (модель площадью  $1\text{ м}^2$ ) в течение часа. При этом не учитываются потери тепла с лицевой стороны, которые будут возрастать по мере разогрева. Эти потери будут ограничивать разогрев теплоносителя в солнечном коллекторе в пределах 70...90 градусов.

Расчет солнечного коллектора показывает, что система площадью  $1\text{ м}^2$  способна нагреть в течении 1 часа 10 литров воды на 70 градусов ( $13,7\cdot 50/70=9,8\text{кг}$ ), что вполне достаточно для обеспечения дома горячей водой. Можно уменьшить время нагревания воды за счет уменьшения объема солнечного коллектора при сохранении его площади. Если же количество проживающих в доме требует большего объема воды – следует применить несколько коллекторов такой площади, которые соединяют в одну систему.

**Для того, чтобы солнечный свет воздействовал на радиатор максимально эффективно, коллектор необходимо ориентировать под углом к линии горизонта, равным широте местности.** Об этом уже говорилось ранее.

Как рассчитать мощность солнечных батарей, действует тот же самый принцип.

В среднем, для обеспечения жизнедеятельности одного человека необходимо 50л горячей воды. Учитывая, что вода до подогрева имеет температуру около  $10^{\circ}\text{C}$ , разница температур составляет  $\Delta t=70 - 10 = 60^{\circ}\text{C}$ . Количество тепла для подогрева воды необходимо следующее:

$$W=c_{\text{в}}\cdot V\cdot \Delta t = 4,2\cdot 50\cdot 60 = 12600 \text{ кДж.}$$

Разделив  $W$  на количество солнечной энергии, приходящейся на  $1\text{ м}^2$  поверхности в данной местности (данные гидрометцентров), получим площадь коллектора.

Расчет солнечного коллектора для отопления производится аналогично. Но объем воды (теплоносителя) необходим больший, что зависит от объема обогреваемого помещения. Можно сделать вывод, что улучшения эффективности водонагревательной системы такого типа возможно достичь методом уменьшения объема и одновременном увеличении площади.

### **Расчет вакуумного солнечного коллектора**

Проектирование системы должно проводиться с учетом: особенностей климата в данной местности; объема отапливаемого помещения и этажности здания; количества проживающих (работающих) людей; типа установленных отопительных приборов; коэффициента теплопроводности стен (определяется исходя из толщины и материала); места размещения теплообменника и т.п.

### **Проектные работы выполняются в два этапа.**

Первый предполагает расчет солнечного коллектора для отопления, а именно определение их количества, необходимого для отопления. Второй этап – привязка полученных результатов к существующей системе отопления.

Подробнее о первом этапе: определяем количество энергии, которое вырабатывается коллектором за день. Для этого следует использовать данные о среднемесячном уровне солнечного излучения  $E_c$  (сведения из гидрометцентра – таблица 2.1) в данной местности. Умножив это значение на площадь коллектора  $S_p$  и его КПД (примем равным 0,8), получим:

$$E_k = E_c \cdot S_p \cdot 0,8 \text{ (кВт/день)}$$

Затем определяем количество расходуемой воды ( $V_{дн}$ , л.), которая нагреется коллектором в течение дня. Это зависит от параметров отопительной системы.

Известно, что для повышения температуры 1л воды на 1 градус требуется затратить 1,16 Вт мощности (в течении 1ч времени). Разделив числовое значение количества вырабатываемой энергии за день на теплоемкость воды, получим разницу температур, на которую солнечный коллектор данной модели может нагреть теплоноситель:

$$\Delta t = E_k / (V_{дн} \cdot c_v), \text{ } ^\circ\text{C}$$

Если расчеты показывают, что полученная температура является недостаточно высокой, для ее увеличения необходимо изменить площадь СК: установить дополнительные вакуумные трубки или панели.

### Пример

Исходные данные:

Температура на выходе из коллектора  $t_r = 70^{\circ}\text{C}$ ;

Температура на входе из коллектора  $t_x = 50^{\circ}\text{C}$ ;

Массовый расход воды через коллектор  $m = 1\text{ кг/с}$ ;

КЛД коллектора  $\eta_k = 40\%$ ;

Количество солнечной энергии, поступающей на  $1\text{ м}^2$  площади поверхности коллектора  $I_k = 20\text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{день}) = 20000\text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$ ;

Теплоёмкость воды  $c = 4,2\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .

Определить: Какая требуется минимальная площадь коллектора солнечной энергии?

### Решение.

Задача посвящена использованию солнечного излучения как источника тепловой энергии. Показателем эффективности коллектора солнечной энергии является его коэффициент полезного действия, равный отношению теплопроизводительности коллектора к количеству солнечной энергии, поступающей на коллектор:

$$\eta_k = Q_k / (I_k A), \quad (2.1)$$

где  $Q_k$  – теплопроизводительность коллектора солнечной энергии;  
 $A$  – площадь поверхности коллектора солнечной энергии.

Поток тепла от приёмника солнечного излучения к теплоносителю (теплопроизводительность коллектора) определяется соотношением:

$$Q_k = m c (T_r - T_x), \quad (2.2)$$

Подставив (2.2) в (2.1) получим:

$$A = Q_k / (I_k \eta_k) = m c (T_r - T_x) / (I_k \eta_k). \quad (2.3)$$

Подставив в (2.3) численные значения входящих величин с учётом того, что за восьмичасовой рабочий день расход воды через коллектор составит:

$$m_8 = 1\text{ кг/с} \cdot 8\text{ ч} \cdot 3600\text{ с} = 28800\text{ кг/день}, \text{ получим:}$$

$$A = 28800\text{ кг/день} \cdot 4,2\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}) (70 - 50)\text{ K} / (20000\text{ кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{день} \cdot 0,4) \approx 300\text{ м}^2.$$

**Ответ.** Минимальная площадь плоского коллектора солнечной энергии для заданных условий составляет  $A_{\text{мин}} = 300\text{ м}^2$

### Контрольные вопросы

1. Какие материалы используются в конструкциях солнечных элементов?
2. Что такое интенсивность солнечного излучения?
3. Перечислите основные элементы систем солнечного теплоснабжения.
4. Что такое гелиоприемник?
5. Что такое солнечный коллектор?
6. Что такое солнечный абсорбер?
7. Каково назначение солнечного аккумулятора?
8. Перечислите основные системы аккумулирования солнечной энергии.
9. Что такое солнечный бассейн?

### Задание

Определить количество энергии, которое вырабатывается коллектором площадью  $1\text{ м}^2$  за день для городов (таблица 2.1) и количество воды которое можно нагреть на  $50^\circ\text{C}$  при помощи этого тепла за сутки.

Варианты: 1 – Алма-Ата, месяц V; 2 - Алма-Ата, месяц VI; 3 - Алма-Ата, месяц VII; 4 - Баку, месяц V; 2 - Баку, месяц VI; 3 - Баку, месяц VII.

Таблица 2.1 - Среднемесячное суточное поступление суммарной  $E$  и рассеянной  $E_d$  солнечной радиации  $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$

	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Алма-Ата ( $43,4^\circ$ с.ш.)												
$E$	6,34	9,24	12,01	16,54	20,52	22,66	23,62	20,79	16,96	11,20	6,67	5,13
$E_d$	3,64	5,21	6,21	6,95	8,10	7,78	6,88	6,34	5,28	4,18	3,34	2,7
$K_r$	0,49	0,51	0,47	0,49	0,53	0,55	0,59	0,59	0,60	0,56	0,47	0,44
$T_H$	-11,5	-8,9	0,80	10,3	16,0	20,3	22,9	21,7	15,6	8,0	-1,2	-8,2
Ашхабад ( $38^\circ$ с.ш.)												
$E$	7,42	10,58	13,63	18,34	24,16	26,83	26,59	24,97	20,57	14,71	9,03	6,48
$E_d$	3,64	5,07	6,34	7,78	8,1	7,92	7,83	6,48	5,98	4,72	3,89	3,24
$K_r$	0,45	0,50	0,49	0,53	0,61	0,65	0,66	0,68	0,68	0,64	0,51	0,44
$T_H$	1,0	4,3	9,8	16,4	22,8	27,3	29,3	27,7	22,6	15,3	8,4	3,7
Баку ( $41,1^\circ$ с.ш.)												
$E$	9,99	14,3	18,49	24,05	27,13	29,61	27,40	25,11	20,01	15,66	10,70	8,77
$E_d$	2,16	2,83	3,78	4,73	5,26	6,53	6,34	5,4	3,89	3,64	2,5	2,02
$K_r$	0,69	0,73	0,70	0,70	0,69	0,72	0,69	0,7	0,69	0,74	0,69	0,69
$T_H$	4,0	4,4	6,8	11,8	18,4	23,4	26,5	26,3	22,1	16,9	11,1	6,7



### 1.3 Практическое занятие 3. Расчет ветроэлектростанции с горизонтальной осью колеса

**Цель занятия:** изучение особенностей использования энергии ветра для выработки электрической энергии и методики расчёта ветроэлектростанций с горизонтальной осью колеса.

#### 1.3.1 Краткие теоретические сведения

Использование ветроустановок для производства электроэнергии является наиболее эффективным способом утилизации энергии ветра. При создании ветроэлектрических установок учитывают следующие особенности:

для обеспечения максимальной эффективности работы ветроустановки следует изменять частоту вращения при изменении скорости ветра, сохраняя постоянным коэффициент быстроходности;

для максимально эффективной работы электрогенератора необходима постоянная частота его вращения;

механические системы управления частотой вращения ветроколеса сложнее и дороже, чем управление изменением электрической нагрузки электрогенератора;

оптимальная частота вращения ветроколеса тем меньше, чем больше его радиус, поэтому только очень малые ветроколеса (радиусом не более 2м) удастся соединить с генератором напрямую. При больших размерах ветроколеса приходится использовать повышающие редукторы.

Ветроустановки в силу конструктивных особенностей не полностью используют потенциальную энергию ветра. Часть энергии теряется за счет инерции покоя ветроколеса, часть – за счет режима регулирования и часть – за счет вывода ветроколеса из под ветра. На рисунке 3.1 показана зависимость мощности, развиваемой ветроустановкой, от скорости ветра. На рисунке 3.2 показан пример схемы ветроэнергетической системы острова Фэйр (Шотландия).

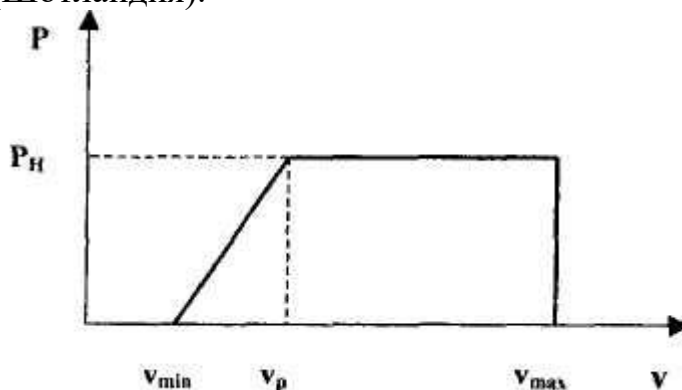


Рисунок 3.1. Зависимость мощности ветроустановки от скорости ветра

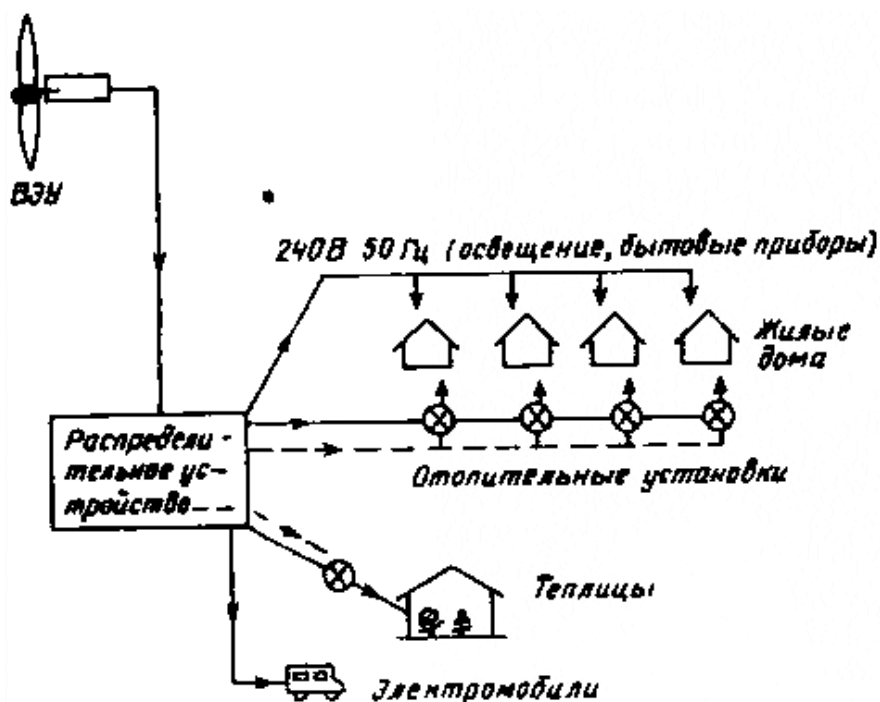


Рисунок 3.2 Схема ветроэнергетической системы

Для стандартных условий по давлению и температуре воздуха мощность, которую способна вырабатывать ВЭУ в зависимости от расчетной скорости ветра и диаметра ветроколеса, приведена в таблице 3.1. Анализ данных показывает, что для маломощной ВЭУ мощностью до 10кВт при  $v_p=8\text{м/с}$  требуется ветроколесо диаметром не менее 12м, мощностью 100кВт – 25м.

Таблица 3.1 - Зависимость мощности ВЭУ [кВт] от диаметра ветроколеса при скорости ветра 6м/с, 8м/с и 10 м/с

Расчетная скорость ветра, м/с	Диаметр ветроколеса, м				
	5	10	20	50	100
6	0,85	3,5	14	85	340
8	2	8	32	200	800
10	4	16	64	400	1600

### 1.3.2 Методика расчёта

Мощность, вырабатываемая ветроколесом:

$$P_{\text{вк}} = \pi \rho D^2 v^3 \xi / 8, \text{ Вт} \quad (3.1)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;

$\xi$  – коэффициент использования энергии ветра (для быстроходных ветроколёс  $\xi = 0,45..0,48$ , для тихоходных  $\xi = 0,35..0,38$ );

$D$  – диаметр ветроколеса, м;

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

Номинальная быстроходность ветроколеса:

$$Z=4 \pi / n_{л}, \quad (3.2)$$

где  $n_{л}$ - число лопастей.

Угловая скорость ветроколеса, с<sup>-1</sup>:

$$\omega=Z v / R, \quad (3.3)$$

где  $R$ – радиус ветроколеса, м

### Пример

Исходные данные:

Температура воздуха  $t_o = 0^{\circ}\text{C}$ ;

Атмосферное давление  $\rho_o = 1,013 \cdot 10^5 \text{Па}$ ;

Мощность ветроколеса  $P_{\text{вк}} = 10 \text{кВт}$ ;

Средняя скорость ветра  $V = 10 \text{м/с}$ ;

Число модулей  $Z = 4$ ;

Коэффициент использования энергии ветра  $\xi = 0,48$ .

**Определить:** Диаметр ветроколеса и частоту его вращения.

### Решение.

Задача посвящена преобразованию кинетической энергии ветрового потока в энергию вращения ветроколеса. Мощность, развиваемая на валу ветроколеса, зависит от его диаметра, формы и профиля лопастей и практически не зависит от их числа согласно формулы (3.1):

$$P_{\text{вк}} = M \cdot \omega = 0,3925 \cdot 10^{-3} \cdot \rho D^2 V^3 \xi, \quad (3.4)$$

где  $P_{\text{вк}}$  – мощность на валу ветроколеса, кВт;

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

$V$  - скорость ветра, м/с;

$D$  – диаметр ветроколеса, м;

$\xi$  – коэффициент использования энергии ветра;

$M$  – момент, развиваемый ветродвигателем;

$\omega$  – частота вращения ветроколеса.

Из уравнения (3.1) находим диаметр ветроколеса:

$$D = [2548 \cdot P_{\text{вк}} / (\rho V^3 \xi)]^{0,5}.$$

При параметрах окружающей среды  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  и  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{Па}$  находим по теплотехническому справочнику плотность воздуха  $\rho = 1,293 \text{кг/м}^3$ . Подставив в (3.4) численные значения входящих величин, получим:

$$D = [2548 \cdot 10 / (1,293 \cdot 1000 \cdot 0,48)]^{0,5} = 6,41 \text{м.}$$

Быстроходность ветроколеса оценивается числом модулей  $Z$ , равным отношению окружной скорости  $\omega D/2$  внешнего конца лопасти радиусом  $R=D/2$ , вращающейся с частотой  $\omega$ , к скорости  $V$  ветра:

$$Z = \omega D / (2 V). \quad (3.5)$$

Из формулы (3.5) получим:

$$\omega = 2 V Z / D = 2 \cdot 10 \cdot 4 / 6,41 = 12,48 \text{ рад/с.}$$

**Ответ.** Диаметр ветроколеса при заданных условиях равен  $D = 6,41 \text{м}$ , а частота его вращения  $\omega = 12,48 \text{рад/с}$ .

### **1.3.3 Задание для самостоятельного решения (контрольная работа №1)**

Рассчитать диаметр и частоту вращения ветроколеса с горизонтальной осью для района (по выбору из рисунка 5.3) мощностью  $P = XY \text{кВт}$  или  $P = 0,XY \text{кВт}$ , где  $X Y$  – последние цифры зачетной книжки. Число лопастей выбирается произвольно. Среднегодовую скорость ветра выбрать произвольно для любого населенного пункта из таблицы 3.2

Таблица 3.2 - Данные о среднемесячных и среднегодовых скоростях ветра в естественных условиях для территории Башкортостана

Метеостанция	Месяцы												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Аксаково	4,4	4,3	4,6	3,7	3,9	3,5	3,0	2,8	3,4	4,2	4,0	4,5	3,9
Акъяр	4,3	4,5	5,0	4,1	4,3	3,8	3,8	3,5	3,5	4,1	4,1	4,0	4,1
Андреерка	4,1	4,2	4,5	3,8	3,8	3,4	2,9	2,9	3,5	3,9	4,0	4,0	3,8
Архангельское	3,1	3,0	3,6	3,1	3,5	2,9	2,5	2,4	3,2	3,6	3,2	3,4	3,1
Аскино	3,2	3,1	3,6	2,7	3,2	2,9	2,4	2,2	2,8	3,4	3,1	3,3	3,0
Баймак	3,4	4,0	4,0	3,7	4,1	3,8	3,4	3,3	3,7	4,3	3,7	3,7	3,8
Бакалы	2,9	2,9	3,2	2,9	3,9	2,8	2,3	2,1	2,6	3,1	3,0	3,0	2,8
Башгосзаповедник	1,7	2,1	2,5	2,5	2,8	2,2	2,5	2,1	2,3	2,4	1,9	1,7	2,2
Белорецк	3,3	3,6	4,3	3,7	3,7	3,1	2,6	2,4	3,1	3,9	3,5	3,4	3,4
Бирск	5,0	4,9	5,1	4,2	4,5	3,8	3,4	3,3	3,9	4,6	4,4	4,6	4,3
Верхотор	2,8	2,8	3,8	2,9	3,7	2,8	2,3	2,2	2,7	3,4	2,8	2,9	2,9
Дуван	3,6	3,7	4,2	3,6	3,8	3,4	2,8	2,6	3,3	3,8	3,6	3,9	3,5
Емаши	3,9	3,8	3,9	3,1	3,5	3,2	2,4	2,3	3,2	4,0	3,8	4,1	3,4
Зилаир	2,6	2,7	3,3	2,9	3,2	2,6	2,5	2,5	2,4	2,7	2,6	2,7	2,7
Инзер	1,3	1,5	1,9	1,7	2,0	1,7	1,4	1,3	1,5	1,7	1,3	1,3	1,6
Кананикольское	2,7	2,9	3,6	3,4	3,4	2,9	2,7	2,5	3,0	3,4	2,7	2,6	3,0

## 1.4 Практическое занятие 4. Расчёт биогазовой установки

**Цель занятия:** изучение особенностей устройства биогазовых установок для личных подсобных и фермерских хозяйств и методики их расчёта.

### 1.4.1 Краткие теоретические сведения

Биогаз – это газ, состоящий примерно из 50...0% метана ( $\text{CH}_4$ ) и 50...30% углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Он образуется в процессе анаэробного разложения (процесс распада органических соединений в условиях отсутствия кислорода) органических субстратов, и по сути является продуктом обмена веществ бактерий. Синонимами для биогаза являются такие слова, как газ-метан, канализационный газ или болотный газ. Для промышленного применения устанавливается дополнительная система очистки биогаза до биометана (от серы, влаги и углекислого газа). После такой очистки, полученный газ – аналог природного газа (90...95% метана  $\text{CH}_4$ ) только разница в его происхождении. Его можно:

- использовать как природный газ;
- накапливать, перекачивать;
- сжигать для производства тепловой и электрической энергии;
- использовать для заправки автомобилей.

Себестоимость газа в Европе из биогазовой установки в 2010 г.: 15...20 евро за  $1000 \text{ м}^3$ . Помимо биогаза установка производит экологически чистое органическое удобрение натурального типа – биоудобрение, содержащее биологически активные вещества и микроэлементы, что повышает урожайность на 30...50%. Основным преимуществом биоудобрений по сравнению с традиционными удобрениями, является форма, доступность и сбалансированность всех элементов питания, высокий уровень гумификации органического вещества. Кроме этого утилизируются отходы и улучшается экологическая обстановка в сельскохозяйственных районах и производственных зонах. При очистке биогаза на том же оборудовании, кроме метана получается  $\text{CO}_2$ , в зависимости от потребностей, его можно получить в газообразном или сжиженном состоянии. В любом случае этот газ является товаром и тоже идёт в прибыль. Сегодня уже существует огромная сеть метановых заправочных станций. В условиях подорожания дизельного топлива использование метана становится более выгодным.

**Биогазовые установки (БГУ)** предназначены для экологически чистой безотходной переработки органических отходов с получением газообразного топлива – биогаза. Выход газа зависит от сырья и технологии производства (таблица 4.1).

БГУ обеспечивают получение биогаза в количестве  $350...500 \text{ м}^3$  при обработке 1т сухого вещества отходов и снижение на 50% энергетических затрат на утилизацию отходов в качестве удобрений – на дегельминтизацию,

уничтожение семян сорных растений, дезодорацию и снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Жидкие биоотходы перекачиваются на биогазовую установку фекальными насосами по бардопроводу или трубопроводу навозоудаления. Канализационная насосная станция (КНС) находится в специальном технологическом помещении. Твёрдые отходы (например, навоз, помёт) доставляются по транспортёрной ленте, а с хранилища помёта или навоза трактором. Жидкие отходы попадают не прямо в реактор, а в предварительную ёмкость. В этой ёмкости происходит гомогенизация массы и подогрев (иногда охлаждение) до необходимой температуры. Обычно объём такой ёмкости на 2...3 дня работы. Твёрдые отходы могут сгружаться в ёмкость с жидкими отходами и перемешиваться с ними. Либо твёрдые отходы загружаются в специальный шнековый загрузчик. Из ёмкости гомогенизации и загрузчика твёрдых отходов биомасса (навоз или помёт или барда) поступает в реактор (другое название **биореактор, метантенк, ферментатор**). Реактор (биореактор, метантенк, ферментатор) является газонепроницаемым, полностью герметичным резервуаром из кислотостойкого железобетона (нержавеющей стали). Это конструкция теплоизолируется слоем утеплителя. Толщина утеплителя рассчитывается под конкретные климатические условия. Внутри реактора (метантенка, ферментатора) поддерживается фиксированная для микроорганизмов температура. Температура в реакторе мезофильная (30...41°C).

В отдельных случаях применяются реакторы с термофильным режимом (около 55°C). Перемешивание биомассы внутри реактора производится несколькими способами. Способ перемешивания выбирается в зависимости от типа сырья, влажности и других параметров. Перемешивание производится наклонными миксерами, миксерами типа «падл–гигант», погружными мешалками. Материал всех перемешивающих устройств – нержавеющая сталь. В отдельных случаях перемешивание не механическое, а гидравлическое, т.е. масса раздаётся насосами по трубкам в слой, где живут колонии бактерий. Срок службы реактора более 25...30 лет.

Подогрев реактора ведётся теплой водой. Температура воды на входе в реактор 60°C. Температура воды после реактора около 40°C. Система подогрева – это сеть трубок, находящихся внутри стенки реактора, либо на её внутренней поверхности. Если биогазовая установка комплектуется когенерационной установкой (теплоэлектрогенератором), то вода от охлаждения генератора используется для подогрева реактора. Температура воды после генератора 90°C. Тёплая вода с температурой 90°C смешивается с водой 40°C и поступает в реактор с температурой 60°C. Вода специально подготовленная и рециркуляционная. В зимний период биогазовой установке требуется до 70% вторичного тепла, отведённого от теплоэлектрогенератора. В летний – около 10%. Если биогазовая установка работает только на производство газа, тогда теплая вода берётся от **специально установленного водогрейного котла**. Затраты тепловой и электрической энергии на нужды

самой установки составляют 5...15% всей энергии, которую даёт биогазовая установка.

Таблица 4.1 - Выход газа из разных видов субстратов

Субстрат	Выход биогаза м <sup>3</sup> /т
Навоз КРС	60
Навоз свиней	65
Птичий помёт	130
Силос кукурузный	400
Свежая трава	500
Молочная сыворотка	50
Зерно	560
Фруктовый жом	70
Свекольный жом	50
Меласса	430
Свекольная ботва	400
Барда зерновая	70
Барда меласная	50
Пивная дробина	160
Жир	1300
Жир из жироловок	250
Отходы бойни	300
Корнеплодные овощи	400
Технический глицерин	500
Рыбные отходы	300

Среднее время гидравлического отстаивания внутри реактора (в зависимости от субстратов) – 20...40 дней. На протяжении этого времени органические вещества внутри биомассы метаболизируются (преобразовываются) микроорганизмами. Для кукурузного силоса период брожения составляет 70...160 дней. Период брожения определяет объём реактора.

Всю работу по сбраживанию отходов проделают анаэробные микроорганизмы. **В биореактор микроорганизмы вводятся один раз при первом запуске.** Дальше никаких добавок микроорганизмов и дополнительных затрат не требуется. Введение микроорганизмов производится одним из трёх способов:

- 1) введение концентрата микроорганизмов;
- 2) добавление свежего навоза;
- 3) добавление биомассы из другого действующего реактора.

Обычно используется 2 и 3 способ из-за дешевизны. В навозе микробы присутствуют и попадают в него ещё из кишечника животных.

Эти микроорганизмы полезны и не приносят вреда человеку или животным. К тому же реактор – это герметичная система. **Поэтому**



**реакторы, а точнее ферментеры, располагаются в непосредственной близости от фермы или производства.**

На выходе имеем два продукта: биогаз и биоудобрения (компостированный и жидкий субстрат).

Биогаз сохраняется в ёмкости для хранения газа – **газгольдере**. Здесь в газгольдере выравниваются давление и состав газа.

**Газгольдер** – это высокопрочная растягивающаяся EPDM мембрана. Материал мембраны стоек к солнечному свету, осадкам и испарениям в реакторе. Срок службы газгольдера 15 лет. Газгольдер герметически накрывает реактор сверху.

Над газгольдером устанавливается дополнительно тентовое покрытие. В пространство между газгольдером и тентом закачивается воздух для создания давления и теплоизоляции. В отдельных случаях газгольдер представляет собой многокамерный мешок. Такой мешок, в зависимости от проектного решения, может крепиться сверху бетонного свода ремнями либо в специальной бетонной ёмкости. Запас объёма газгольдеров обычно рассчитан 0,5...1 день работы установки.

Из газгольдера идёт непрерывная подача биогаза в газовый или дизель-газовый теплоэлектрогенератор. Здесь уже производится тепло и электричество (1м<sup>3</sup> газа даёт 2кВт·ч электрической и 2кВт·ч тепловой энергии). Крупные биогазовые установки имеют **аварийные факельные установки** на тот случай, если двигатель/двигатели не работают и биогаз надо сжечь. Газовая система может включать в себя вентилятор, конденсатоотводчик, десульфуратор и т.п.

Всей системой управляет система автоматики. Система контролирует работу насосной станции, мешалок, системы подогрева, газовой автоматики, генератора. Для управления достаточно всего одного человека на 2 часа в день. Этот человек ведёт контроль с помощью обыкновенного компьютера.

Переброшенная масса – это биоудобрения, готовые к использованию.

Жидкие биоудобрения отделяются от твёрдых с помощью сепаратора и сохраняются в ёмкости для хранения биоудобрения. Твёрдые удобрения хранятся на специальном участке. Из ёмкости хранения жидких удобрений насосами масса перекачивается в бочки-прицепы и вывозится на свои поля или на продажу. Как вариант возможна комплектация биогазовой установки линией фасовки и упаковки биоудобрений в бутылочки по 0,3; 0,5, 1,0л. Если биоудобрения не представляют никакого интереса для собственника, что вообще странно, и требуется избавиться от жидкого субстрата, тогда биогазовая установка комплектуется устройствами с дополнительными степенями очистки.

В случае, когда предприятию требуется не электроэнергия, а газ для заправки автомобилей, биогазовая установка комплектуется системой очистки и метановой заправочной станцией. Система очистки биогаза – устройство по отделению CO<sub>2</sub> из биогаза. Например, если требуется техническая углекислота, то её получают по принципу абсорбера–десорбера.

Содержание углекислого газа доводится с 40 до 10% (и даже 1%, если требуется).

Для отдельных видов сырья описанный выше способ требует коррекции. Например, такой способ совершенно недопустим для моносырья, такого как послеспиртовая барда и пивная дробина. В таком случае используется двухстадийная технология с дополнительными реакторами гидролиза. Особенностью процесса является поддержание уровня кислотности в реакторах гидролиза. Технология запатентована компанией ZORG (Германия) и тщательно охраняется, что делает невозможным другим компаниям, даже если им станет известно ноу-хау, использовать этот метод и устройство.

Установка на себя потребляет всего 10...15% энергии зимой и 3...7% летом. Для работы очень большой установки достаточно 1 человека на 2 ч

На рисунке 4.1 представлена обобщённая схема биогазовой установки.

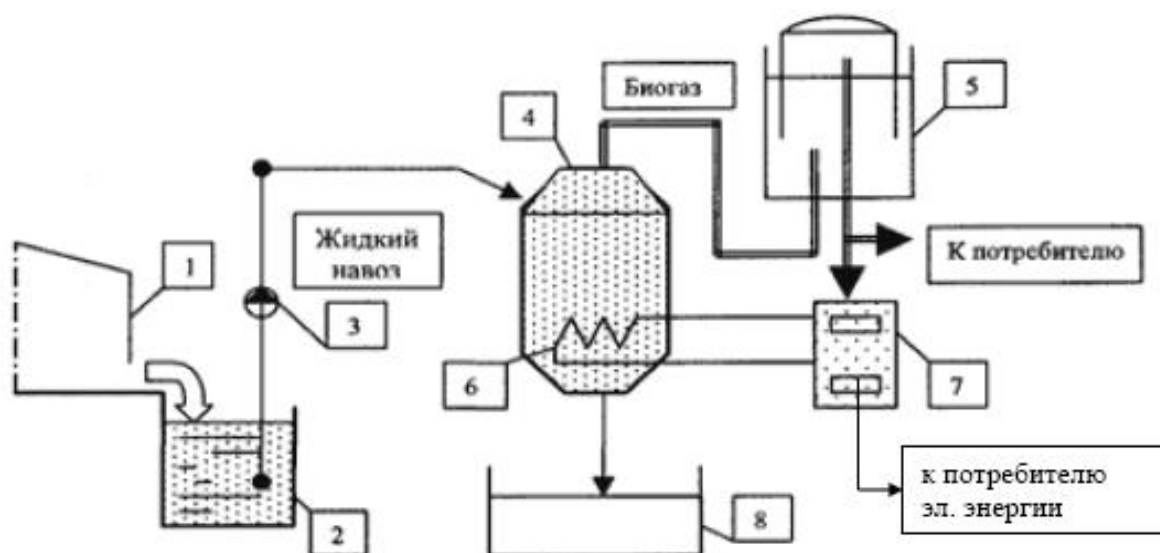


Рисунок 4.1 Обобщённая схема биогазовой установки: 1 – ферма; 2 – навозоприёмник; 3 – насос; 4 – метантенк; 5 – газгольдер; 6 – теплообменник; 7 – газопоршневой генератор; 8 – хранилище удобрения.

На рисунке 4.2. показана принципиальная схема простейшей биогазовой установки.

В таблице 4.1 приведены краткие технические характеристики биоэнергетических установок, производимых в России.

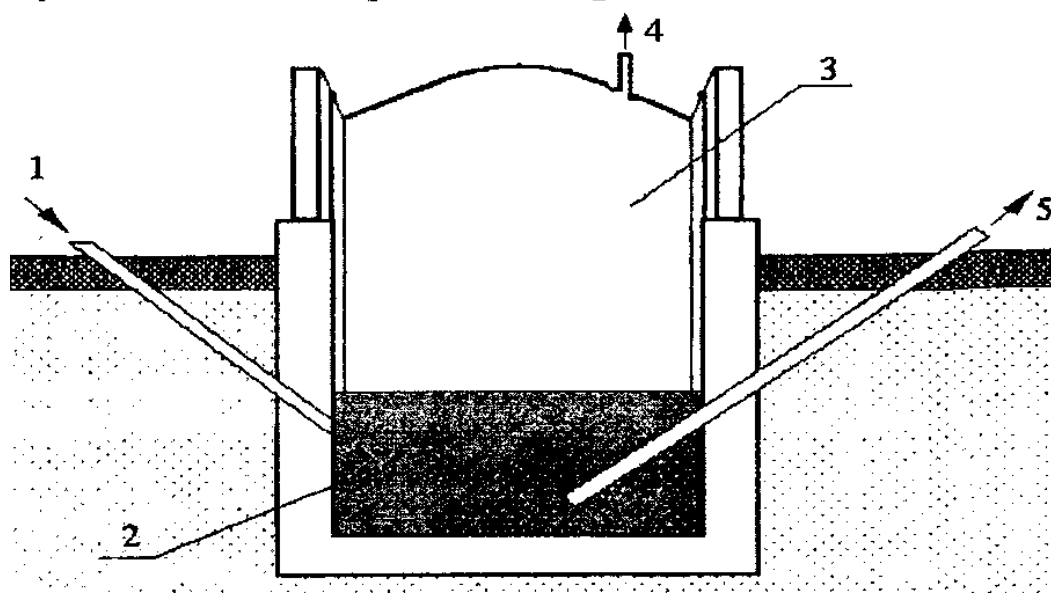


Рисунок 4.2. Принципиальная схема простейшей биогазовой установки для личного хозяйства: 1 - приемное устройство; 2 - метантенк; 3 - пространство для сбора биогаза; 4 - патрубок, соединяющий метантенк с газгольдером; 5 - устройство для отсасывания шлама из метантенка.

Таблица 4.1 - Биоэнергетические установки, производимые в России, и их краткие технические характеристики

Технические показатели	Биогазовые установки	
	ИБГУ-1	БИОЭН-1
Сырье	Отходы КРС, мелкого рогатого скота, лошадей, верблюдов, свиней, пушных зверей, птицы: кур, уток, гусей, индюшек; фекалии, растительные остатки, твердые бытовые отходы	
Влажность допустимая	Не менее 85%	
Количество перерабатываемого сырья	200 кг/сут	1000 кг/сут
Состав топлива	Метан 60% CO <sub>2</sub> 40%	Метан 60% CO <sub>2</sub> 40%
Теплота сгорания топлив	21000-25100 кДж/м <sup>3</sup> (при нормальных условиях)	
Количество вырабатываемого топлива (энергии)	10 м <sup>3</sup> /сут	40 м <sup>3</sup> /сут, 80 кВт ч (эл.эн.) 230 кВт ч (тепл. эн.)
Мощность электрогенератора	-	4 кВт
Мощность теплогенератора	-	23,2 кВт
Затраты топлива (энергии) на собственные нужды установки	15 кВтч/сут	30% от вырабатываемого биогаза
Режим работы	Электрозависимый, ТЭН 2 кВт	Автономный
Температура процесса	52...55°C	
Размер отапливаемой площади	-	120-140 м <sup>2</sup>
Дополнительно производимые продукты	Жидкие экологически чистые органические удобрения	
Норма применения удобрений	1...3т на 1 га в год	
Фирма-изготовитель	АО Центр "ЭкоРос", АО "Стройтехника - Тульский завод", АО "Юргинский машиностроительный завод", АО "Заволжский авторемонтный завод"	

## 1.4.2 Методика расчёта

Для расчёта основных параметров биогазовой установки необходимо найти значения следующих показателей:

1. Суточный выход экскрементов, кг:

$$m_{\text{сут}} = N_{\text{ж}} m_{\text{уд}},$$

где  $N_{\text{ж}}$  - количество животных, гол;

$m_{\text{уд}}$  - удельный выход экскрементов в сутки.

Если навоз загружается с подстилкой, необходимо применять поправочный коэффициент  $K$ , учитывающий органическую массу подстилки. Тогда:

$$m_{\text{сут.подс}} = K m_{\text{сут}} =$$

2. Определяют долю сухого вещества (СВ) в загружаемом материале:

$$m_{\text{сут}}^{\text{сух}} = m_{\text{сут}} [1 - W_{\text{экс}} / 100],$$

где  $W_{\text{экс}}$  - влажность массы экскрементов, %.

В расчетах можно принять, что средняя влажность навоза КРС составляет 85...90%, свиней 88...92%, помета кур 73...76%.

3. Определяют долю сухого органического вещества (СОВ) в навозе:

$$m_{\text{СОВ}} = m_{\text{сут}}^{\text{сух}} \rho_{\text{СОВ}} / 100,$$

где  $\rho_{\text{СОВ}}$  - доля СОВ в сухом веществе навоза, %.

4. Определяют выход биогаза при полном разложении СОВ навоза, м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{бг}} = n_{\text{бг}} m_{\text{СОВ}},$$

где  $n_{\text{бг}}$  - выход биогаза из 1 кг СОВ различного исходного материала, м<sup>3</sup>/кг. Например, для навоза бычков выход газа, отнесённый к массе составляет 0,315 м<sup>3</sup>/кг, для навоза свиней – 0,415 м<sup>3</sup>/кг и т.д.

5. Определяют объем полученного биогаза при выбранной продолжительности метанового брожения, м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{бгП}} = V_{\text{бг}} n_{\text{I}} / 100,$$

где  $n_1$  - доля выхода биогаза от исходного материала при данной продолжительности метанового процесса, % (см. таблицу 4,5).

6. Если объем метантенка предварительно не определен, то расчет продолжается в следующем направлении.

Находят объем метантенка,  $m^3$ :

$$V_M = m_{сут}^{сух} / n_V,$$

где  $n_V$  - рекомендуемый объем загрузки СВ в сутки,  $кг/м^3$  (см. таблицу 4.5)

Объем метантенка необходимо согласовывать с объемом полной загрузки:

$$V_{полн} = m_{сут} t_{сут} / \rho_M,$$

где  $m_{сут}$  - суточная загрузка метантенка,  $кг/сут$ ;

$t_{сут}$  - продолжительность процесса брожения,  $сут$ .;

$\rho_M$  - удельная плотность сбраживаемой массы,  $кг/м^3$ .

Удельную плотность навоза можно считать равной удельной плотности воды, так как влажность навоза обычно более 90%.

Если  $V_{полн} \ll V_M$ , то значительная часть метантенка использоваться не будет. Метантенк - наиболее капиталоемкий элемент биогазовой установки, и понятно, что такой вариант экономически будет проигрывать.

При  $V_{полн} = V_M$  могут возникнуть проблемы со сбором биогаза, так как пена, образующаяся в процессе брожения, будет забивать канал сбора биогаза. Желательно, чтобы соотношение  $V_{полн} / V_M$  составляло 0,7...0,9.

Если собираются применять стандартный метантенк, то останавливаются на ближайшем большем его объеме; для индивидуального метантенка проводят соответствующие расчеты. Рекомендуется выбирать метантенк цилиндрической формы. Для удобства сбора шлама и биогаза верхнюю и нижнюю части метантенка выполняют в виде усеченного конуса с горловиной в верхней части. Определяется способ перемешивания сбраживаемой массы (механическое перемешивание, барботаж).

Далее проводится **тепловой расчет метантенка:**

7. Количество теплоты, необходимое для подогрева загружаемой массы до температуры брожения в сутки, МДж:

$$Q_{\text{под}} = m_{\text{сут}} C_c (T_{\text{бр}} - T_{\text{заг}}) / \eta,$$

где  $C_c$  - средняя теплоемкость субстрата, МДж/(кг·°К);

$T_{\text{бр}}$  - температура процесса брожения, °К;

$T_{\text{заг}}$  - температура загружаемого субстрата, °К;

$\eta$  - коэффициент полезного действия процесса.

Температура загружаемой массы зависит от способа загрузки навоза в метантенк:

если масса поступает непосредственно из животноводческого помещения, то температура ее будет такой же, как внутри помещения;

если массу берут из навозохранилища, то ее температура зависит от наружного воздуха.

Для расчётов можно принять  $T_{\text{заг}} = 288^\circ\text{К}$ , среднюю теплоемкость навоза  $4,18 \cdot 10^{-3}$  МДж/(кг·°К), коэффициент полезного действия процесса – 0,7.

8. Количество теплоты, теряемое субстратом в процессе теплоотдачи через стенку реактора в окружающую среду за час, Вт·ч:

$$Q_{\text{пот}} = k F (T_{\text{пр}} - T_{\text{сред}}),$$

где  $k$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°К);

$T_{\text{пр}}$  - температура субстрата, °К;

$T_{\text{сред}}$  - температура окружающего воздуха, °К;

$F$  - площадь поверхности теплообмена метантенка, м<sup>2</sup>.

$$k = 1 / (1/\alpha_1 + \sum \delta_i / \lambda_i + 1/\alpha_2),$$

где  $1/\alpha_1$   $1/\alpha_2$  - термическое сопротивление теплоотдачи от субстрата к внутренней поверхности стенки метантенка и от внешней поверхности теплоизоляции метантенка к окружающей среде;

$\sum \delta_i / \lambda_i$  - суммарное термическое сопротивление теплопроводности материала стенок метантенка и теплоизоляции. Если теплоизоляция многослойна, в расчетах учитывается каждый слой.

Потери теплоты через стенки реактора рассчитываются для самых холодных и тёплых суток года (например  $T_{\text{сред}} = -30^\circ\text{С}$  и  $T_{\text{сред}} = +20^\circ\text{С}$ ), далее для приближенных расчетов можно считать, что тепловые потери в среднем за сутки года равны среднеарифметическому этих величин.

9. Определяют затраты энергии на перемешивание биомассы  $Q_{\text{мех}}$ . На основании экспериментальных данных затраты энергии на перемешивание механическими мешалками можно принять равными 30...60Вт/м<sup>3</sup> при режиме 4ч работы и 7ч паузы.

10. Общие затраты энергии на поддержание процесса в сутки, Вт·сут:

$$Q_{\text{общ}} = (Q_{\text{под}} + Q_{\text{пот}}) + Q_{\text{мех}} t_{\text{мех}}/24,$$

где  $t_{\text{мех}}$  - время работы механической мешалки в сутки, ч.

11. Потенциальные запасы энергии биогаза, выработанного в сутки:

$$Q_{\text{БГ}} = V_{\text{БГ}} C_{\text{БГ}},$$

$V_{\text{БГ}}$  - объём биогаза, выработанного в сутки, м<sup>3</sup>;

где  $C_{\text{БГ}}$  - теплотворная способность биогаза, МДж/м<sup>3</sup>.

12. Энергетический эффект установки:

$$\mathcal{E}_{\text{уст}} = Q_{\text{БГ}} - Q_{\text{общ}}.$$

13. Коэффициент товарности биогазовой установки, %:

$$K_{\text{тов}} = 100 (Q_{\text{БГ}} - Q_{\text{общ}}) / Q_{\text{БГ}}.$$

### 1.4.3 Справочные данные

Таблица 4.3 - Суточное количество экскрементов у КРС, свиней, кг

Вид животного	Количество экскрементов, кг	Вид животного	Количество экскрементов, кг
Быки-производители	40	Свиноматки:	
Коровы	35...55	холостые	8,6...8,8
Молодняк:		супоросные	10...10,8
телята до 6 мес.	7,5...15	Подсосные поросята до 30 кг	12,4...15,3
на откорме 6...12 мес.	14...26	Свиньи на откорме	1,8...2,4
нетели 12...18 мес.	27	массой, кг: до 40	3,2...3,5
на откорме старше 18 мес.	35	40...80	4,5...5,1
Хряки	9,2...11,1	более 80	6,2...6,6

Таблица 4.4 - Состав побочных продуктов в % к сухому веществу

Компоненты	КРС	Дойные коровы	Свины	Куры
Органическая масса	77,0...85,0	77,0...85,0	77,0...84,0	76,0...77,0
Азот	2,3...4,0	1,9...6,5	4,0...10,3	2,3...5,7
Фосфор	0,4...1,1	0,2...0,7	1,9...2,5	1,0...2,7
Калий	1,0...2,0	2,4	1,4...3,1	1,0...2,9
Кальций	0,6...1,4	2,3...4,9	-	5,6...11,9
Сырая клетчатка	27,6...50,6	27,6...50,6	19,5...21,4	13,0...17,8
Лигнин	13,0...30,0	16,0...30,0	-	9,6...14,3

Таблица 4.5 Зависимость степени разложения биомассы от загрузки реактора и продолжительности брожения (температура около 33 °С)

Экскременты	Загрузка СВ, кг, на 1м <sup>3</sup> объема реактора в сутки	Время пребывания, сутки	Степень разложения, %
Дойных коров	6,0	15	40
Бычков на откорме	4,5	10	40
Свиной	3,0	10	50
Кур-несушек	1,5	50	55

### Пример

Исходные данные:

Число коров  $n = 20$ ;

Время работы при полной загрузке  $\tau = 15$  сут;

Температура сырья в метатенке  $t = 30^{\circ}\text{C}$ ;

Суточный выход сухого экскремента от одной коровы  $m = 2$  кг/сут;

Выход газа с 1кг сухого материала  $v_{\text{г}} = 0,3$  м<sup>3</sup>/кг;

Концентрация метана в биогазе  $C_{\text{CH}_4} = 65\%$ ;

Концентрация углекислого газа в биогазе  $C_{\text{CO}_2} = 35\%$ ;

Плотность биогаза в газогенераторе  $\rho = 50$  кг/м<sup>3</sup>;

Теплотворная способность метана  $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 35,82$  МДж/м<sup>3</sup>;

КПД процесса  $\eta = 65\%$ ;

Влажность материала в метатенке  $W = 95\%$ .

**Определить:** Суточный выход биогаза в метатенке, тепловую мощность устройства, использующего биогаз и объём биогазогенератора.

### Решение.

Задача посвящена преобразованию энергии биомассы в биогаз.

Суточный выход сухого материала от  $n=20$  коров для сбраживания в метатенке определяется по формуле:

$$m_{\text{сух}} = m \cdot n = 2 \text{ кг/сут} \cdot 20 = 40 \text{ кг/сут.}$$

Выход биогаза при полном разложении (сбраживании):

$$V_{\text{г}} = v_{\text{г}} \cdot m_{\text{сух}} = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 40 \text{ кг/сутки} = 12 \text{ м}^3/\text{сут.}$$



Энергия биогаза, вырабатываемая на протяжении суток:

$$Q_{\text{бг}} = V_{\text{г}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot C_{\text{СН}_4} \cdot 10^{-2} = 12 \text{ м}^3/\text{сут} \cdot 35,82 \text{ МДж/м}^3 \cdot 65 \cdot 10^{-2} = 279,4 \text{ МДж/сут}.$$

Мощность устройства, использующего биогаз:

$$P = \eta \cdot 10^{-2} \cdot Q_{\text{бг}} = 65 \cdot 10^{-2} \cdot 279,4 \text{ МДж/сут} = 181,6 \text{ МДж/сут}.$$

Масса влажного материала, подаваемого в метантенк на сбраживание:

$$m_{\text{вл}} = m_{\text{сух}} [100/(100 - W)] = 40 \text{ кг/сут} [100/(100 - 95)] = 800 \text{ кг/сут}.$$

Объем биогазогенератора при полной загрузке:

$$V_{\text{б}} = m_{\text{вл}} / (\tau_{\text{сут}} \cdot \rho_{\text{м}}),$$

где  $\tau_{\text{сут}}$  – число загрузки метантенка за сутки;

$\rho_{\text{м}}$  – плотность жидкой массы в метантенке.

При однократной загрузке метантенка за 15 суток и плотности жидкой массы в метантенке, практически равной плотности воды  $\rho_{\text{м}} = 1000 \text{ кг/м}^3$  (так как влажность жидкой массы равна 95%), получим:

$$V_{\text{б}} = 800 \text{ кг/сут} / (1000 \text{ кг/м}^3 / 15 \text{ сут}) = 12 \text{ м}^3.$$

**Ответ.** Суточный выход биогаза в метантенке составляет  $12 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; тепловая мощность устройства, использующего биогаз равна  $181,6 \text{ МДж/сут}$ ; объем биогазогенератора –  $12 \text{ м}^3$ .

#### **1.4.4 Задание для самостоятельного решения (контрольная работа №2)**

Определить конструктивные и технологические параметры биогазовой установки для личного подсобного хозяйства, имеющего  $X$  коров,  $Y$  телят,  $Z$  нетелей до 18 мес., где  $Z$ ,  $Y$  и  $X$  – три последние цифры зачетной книжки.

Условия работы установки: мезофильное брожение с температурой процесса  $32^\circ\text{C}$ , продолжительность процесса 15 суток, загрузка навоза непрерывная с ежедневной заменой  $1/15$  сбраживаемой массы. Метантенк бетонный, с толщиной стенок  $0,15 \text{ м}$ , цилиндрический. Теплоизоляция – шлакобетон ( $0,3 \text{ м}$ ), шлаковая засыпка ( $0,5 \text{ м}$ ) и земляной вал ( $1 \text{ м}$ ). Сбраживаемая масса до температуры процесса нагревается за счет водяных теплообменников. Перемешивание массы механическое за счет электрического привода. Вопросы автоматизации, конструктивных решений

загрузки навоза, выгрузки шлама и исполнения газгольдера не рассматриваются.

Принять поправочный коэффициент  $K$ , учитывающий органическую массу подстилки 1,5; термическое сопротивление теплоотдачи от субстрата к внутренней поверхности стенки метантенка  $1/\alpha_1$  и от внешней поверхности теплоизоляции метантенка к окружающей среде  $1/\alpha_2 = 0,05$ . Коэффициенты теплопроводности шлакобетона – 0,6, шлаковой засыпки – 0,25, земли – 2,0Вт/(м·К). Теплотворная способность биогаза = 22МДж/м<sup>3</sup>.

### **Контрольные вопросы**

1. Основные характеристики биогаза .
2. Принцип работы биогазовой установки.
3. Назовите основные способы переработки биомассы?
4. Какова эффективность сжигания биотоплива? Как её можно повысить?
5. В чём сущность анаэробного сбраживания?
6. Какова эффективность анаэробной переработки навоза?

### **Библиографический список**

1. Сибикин, Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. - М.: Кнорус, 2010. - 228 с.
2. Саплин Л.А., Шерязов С.К., и др. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников. – Челябинск: ЧГАУ, 2000. – 194 с.

## 1.5 Практическое занятие 5. Расчёт аккумулятора тепла

### 1.5.1 Теоретическая часть

#### Общие сведения.

Одной из ключевых проблем нетрадиционной, в первую очередь, солнечной энергетики является проблема теплового аккумулирования. Тепловые аккумуляторы эффективно используются также в комплексе с ветроэлектрическими агрегатами, фотобатареями и в традиционной энергетике для снятия пиковых нагрузок.

**Тепловое аккумулирование** - это физический или химический процесс, посредством которого происходит накопление тепла в тепловом аккумуляторе энергии.

**Тепловыми аккумуляторами (ТА)** называют устройства, обеспечивающие протекание обратимых процессов накопления, хранения и отдачи тепловой энергии в соответствии с нуждами потребителя.

Аккумулирование тепла в различных энергосистемах ориентировано в первую очередь на отопление и горячее водоснабжение. Применение аккумуляторов тепла в водонагревательной системе позволяет приспособлять ее к условиям спроса на горячую воду, изменяющегося в течение суток. Применение различных способов накопления тепловой энергии при использовании солнечных энергетических установок позволяет также преодолеть проблему, обусловленную суточной периодичностью и непостоянством поступления солнечной энергии. Даже в условиях безоблачного неба необходимое количество энергии при соответствующей температуре теплоносителя можно получить только на протяжении нескольких часов до и после полудня. Например, солнечные энергетические установки, предназначенные для отопления помещений, поддерживают температуру теплоносителя на уровне 60 °С лишь около трех часов в сутки. Поскольку в подобных системах периоды потребления и получения энергии не совпадают, накапливать ее необходимо в одни периоды суток, а использовать - в другие.

Практическое применение различных типов тепловых аккумуляторов связано в первую очередь с определением их оптимальных рабочих характеристик, с **выбором недорогих и эффективных конструкционных материалов и теплоаккумулирующих сред.**

Эффективность теплового аккумулятора при прочих равных условиях определяется массой и объемом **теплоаккумулирующего материала (ТАМ)**, необходимого для обеспечения заданных параметров процесса.

**Классификация тепловых аккумуляторов** проводится в соответствии с несколькими главными признаками:

**по природе аккумулирования:**  
**теплоемкостные (ТЕА),**

**аккумуляторы с фазовым переходом (АФТ),  
термохимические аккумуляторы (ТХА);**

**по уровню рабочих температур:**

низкотемпературные (до 100°C) ТА,

среднетемпературные ТА (от 100 до 400°C),

высокотемпературные ТА (свыше 400°C)

**по продолжительности периода заряд-разряд ТА:**

краткосрочные (до 3-х суток),

среднесрочные (до 1 месяца),

межсезонные (до полугода).

**Выбор и конструирование ТА** проводится с учетом параметров энергосистемы и потребителя тепловой энергии. Как правило, в нетрадиционной энергетике используются краткосрочные или среднесрочные низкотемпературные теплоемкостные аккумуляторы и аккумуляторы с фазовым переходом.

При рассмотрении характеристик аккумулирующих и теплообменных сред, применяемых в тепловом аккумуляторе, можно выделить такие **основные разновидности теплового аккумулирования:**

**прямое аккумулирование тепловой энергии** - аккумулирующим и теплообменным веществом является одна и та же среда; аккумулирующая среда может быть твердой, жидкой, газообразной или двухфазной (жидкость + газ);

**косвенное аккумулирование** - энергия аккумулируется посредством теплообмена (например, теплопроводностью через стенки резервуара) или в результате массообмена специальной теплообменной среды (в жидком, двухфазном или газообразном состоянии). Аккумулирующая среда может быть твердой, жидкой или газообразной, процесс может протекать без фазового перехода или с фазовым переходом (твердое тело- твердое тело, твердое тело-жидкость, жидкость-пар);

**полупрямое аккумулирование** - процесс проходит, как во втором случае, за исключением того, что аккумулирующая емкость теплообменной среды играет наиболее важную роль;

**сорбционное аккумулирование** - в этом случае используется способность некоторых аккумулирующих сред абсорбировать газы с выделением или поглощением тепла при десорбции газа. Передача энергии может происходить непосредственно в форме тепла или с помощью газа .

**Технические решения.**

Широкий спектр проблем при применении аккумуляторов тепла и большое разнообразие методов аккумулирования приводят к различным техническим решениям, причем для каждого конкретного случая внедрения ТА в энергетическую систему на основе нетрадиционных и возобновляемых

источников энергии необходимо проведение детальных исследований и расчетов.

**Аккумуляирование тепла за счет теплоемкости наименее эффективно**, низкая теплоемкость многих доступных теплоаккумуляующих материалов должна компенсироваться использованием больших объемов ТАМов, разряд аккумуляторов характеризуется переменной температурой. Эти **аккумуляторы еще называются теплоемкостными (ТЕА)**, так как их работа основана на использовании теплоемкостных характеристик различных твердых и жидких веществ.

**Аккумуляторы, использующие тепловые эффекты обратимых фазовых переходов (АФП)**, характеризуются более высокой плотностью теплового потока при малом объеме ТАМов и практически **постоянной температурой разряда**. Однако данный метод имеет свои недостатки: во-первых, стоимость ТАМов с фазовым переходом выше стоимости традиционных теплоемкостных материалов (камень, вода, гравий), во-вторых, теплообмен в АФП требует наличия развитой поверхности теплопередачи, что значительно увеличивает их стоимость. Поэтому при разработке ТА должна учитываться не только стоимость ТАМов, но и стоимость устройства АФП с учетом доступности аккумуляющих и конструкционных материалов.

**Плотность энергии в аккумуляторах на основе обратимых химических реакций (так называемые термохимические аккумуляторы - ТХА)** выше плотности энергии в АФП и значительно выше, чем в ТЕА. Принцип работы ТХА основан на аккумуляровании энергии, которая поглощается и освобождается **при разрыве и создании молекулярных связей в полностью обратимых химических реакциях**. При создании ТХА существуют значительные затруднения, обусловленные небольшим количеством дешевых химических соединений, пригодных для ТХА, и выделением газов в процессе химических реакций.

**Таким образом, на практике широко используют теплоемкостные аккумуляторы и аккумуляторы с фазовым переходом**. Они рекомендуются как для промышленности с использованием значительных объемов, так и в индивидуальных хозяйствах и технологических процессах. Аккумуляторы ТХА могут быть рекомендованы лишь в определенных случаях с использованием безопасных технологий.

### **Тепловое аккумуляирование.**

Для создания эффективных тепловых аккумуляторов необходимо **решить такие первоочередные задачи:**

внедрение теплоаккумуляующих материалов с высокими удельными энергетическими характеристиками, большим ресурсом работы и широким диапазоном рабочих температур;

выбор конструкционных материалов с высокими теплотехническими и коррозионностойкими характеристиками;  
создание оптимальных конструкций ТА в зависимости от функционального назначения, источника энергии и нужд потребителей.

**При выборе рабочих веществ для тепловых аккумуляторов** необходимо учитывать энергетические и эксплуатационные характеристики, как источника энергии, так и самого аккумулятора.

**Основными рабочими характеристиками ТАМов являются:**

удельная энергия,  
рабочий диапазон температур,  
стабильность и безопасность в работе,  
низкая коррозионная агрессивность,  
недефицитность и невысокая стоимость.

**При использовании в качестве ТАМов гидратов солей** обращают внимание на их способность присоединять и терять молекулу воды при нагреве и охлаждении.

В зависимости от ряда факторов тепловой аккумулятор может иметь **постоянные или переменные показатели массы, объема и давления.**

**Постоянная масса** ( $dM_{ак} = 0$ ) - как правило, для случая косвенного аккумулирования, однако может быть таковой и при прямом аккумулировании, если перемешиваемая часть массы после охлаждения (разряд ТА) или нагрева (заряд ТА) полностью возвращается в аккумулятор.

**Переменная масса** ( $dM_{ак} > 0$ ) - всегда в случае прямого аккумулирования.

**Постоянный объем** ( $dV_{ак} = 0$ ) - для случая аккумулирования в закрытых резервуарах.

**Переменный объем** ( $dV_{ак} > 0$ ) - для случая аккумулирования в условиях атмосферного давления или при помощи специального компрессионного оборудования.

## **ВОЗДУШНЫЙ ТЕПЛОАККУМУЛЯТОР**

Из нескольких теплоаккумулирующих сред для теплоаккумуляторов воздушного типа наиболее известными и употребимыми являются камни. Хотя применение этого материала кажется сравнительно дешевым и легким решением, однако, это не всегда так. Наиболее существенным преимуществом камней является их низкая стоимость (если камней действительно много).

В зависимости от конструкции и размеров отсека для камней могут потребоваться камни размером до 100мм. На 1м<sup>2</sup> коллектора требуется 35...180кг камней из-за их малой теплоемкости. Огромное количество камней усложняет проблему их транспортировки и перегрузки, а также требует отсека, достаточного по размеру, чтобы вместить их. При 30% пустот объем

камней, необходимый для аккумуляции того же количества тепла, что и бак с водой, должен быть в 2,5 раза больше.

Большая площадь в плане этих отсеков-аккумуляторов влечет за собой более высокие строительные расходы и большие потери тепла.

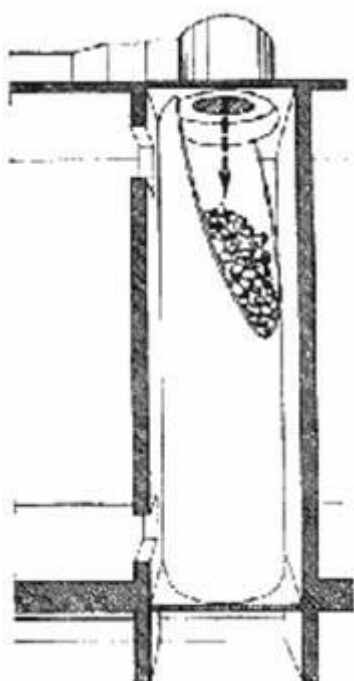
Потенциальная возможность более значительных потерь тепла из больших отсеков с камнями по сравнению с меньшими по размеру водяными баками, тем не менее, компенсируется сравнительно медленным естественным движением тепла через камни в отличие от постоянного движения воды внутри большого бака при изменении температуры (например, из-за потери тепла).

Одним из серьезных ограничений в использовании камней является **недостаточность их универсальности как рабочих тел для других целей помимо аккумуляции тепла**, они, например, не могут служить теплоносителем для подогрева воды, охлаждения и даже отопления жилого помещения. Один из немногих и наиболее распространенных способов приготовления горячей воды в этом случае заключается в установке небольшого ( $0,1...0,4\text{м}^3$ ) неизолированного водяного бака между камнями. Теплообмен протекает медленно, но продолжается круглые сутки.

Методы солнечного охлаждения применимы тогда, когда камни удерживают прохладу для дальнейшего использования. Эту прохладу можно получить путем:

- циркуляции холодного ночного воздуха;
- воздуха, охлажденного ночной радиацией;
- воздуха, охлажденного внепиковыми холодильными компрессорами.

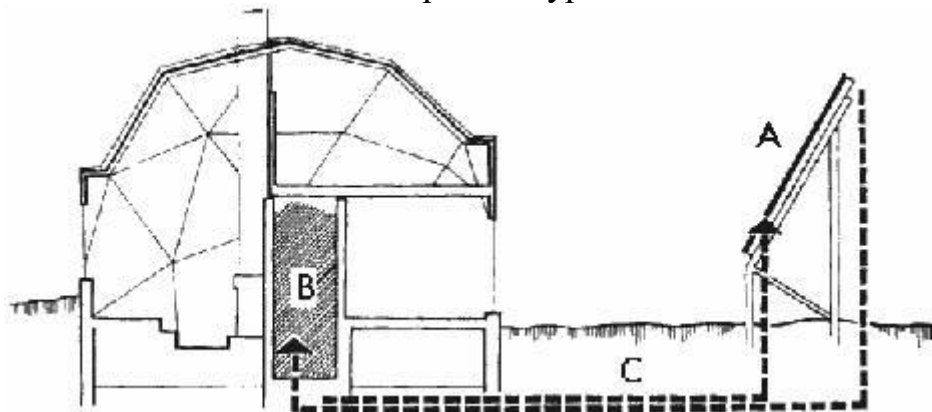
Воздушные теплоаккумулирующие системы ограничивают способ передачи тепла окружающему пространству.



На рисунке 5.1 показан купольный дом, в котором отсек с камнями расположен в пределах помещения. Передача тепла из отсека в помещение происходит медленно путем естественной конвекции из комнаты в нижнюю часть отсека и оттуда через верх, а при необходимости, при помощи небольших вспомогательных вентиляторов (куполообразная форма была выбрана заказчиком, а отдельно стоящий коллектор указывает на ограничения, накладываемые строительным участком).

*Рисунок 5.1. Воздушные коллекторы (расположенные отдельно) и теплоаккумулятор с твердой засыпкой в купольном доме: А - панели коллектора; В - контейнер теплоаккумулятора с кирпичным или каменным щебнем; С - подземный изолированный канал для подачи воздуха.*

Местоположение теплового аккумулятора с камнями может явиться серьезным ограничением в их использовании. Если теплоаккумулятор размещается в подвале здания, то расходы на сооружение отсека обязательно должны быть включены в общую стоимость системы солнечного теплоснабжения. Однако, если под тепловой аккумулятор отводится подвал, предназначенный для других целей, или жилое помещение, то стоимость сооружения такого отсека добавляется к стоимости системы. На рисунке 5.2 показано использование контейнера-аккумулятора с засыпкой из камней в качестве архитектурного элемента здания.



*Рисунок 5.2. Засыпка, содержащаяся в вертикальном цилиндре*

В данном доме этот способ применен довольно удачно. Однако из-за большого веса контейнеров или отсеков для камней под ними должны предусматриваться прочные фундаменты.

**Одна из важных причин того, что теплый воздух подается из коллектора в верхнюю часть отсека, заключается в стремлении обеспечить температурную стратификацию.** Это дает возможность нагревать комнатный воздух до наивысшей возможной температуры при помощи самых теплых камней, находящихся в верхней части отсека. Если теплый воздух будет поступать через низ отсека, даже без перемещения внутри него, то тепло из нижней части распределится равномерно по всему отсеку, что вызовет в нем общее понижение температуры. Подача комнатного воздуха в то же место, что и теплого воздуха из коллектора, будет способствовать этому выравниванию тепла по отсеку, а не нагреву воздуха в целях отопления здания.

**Форма отсека теплового аккумулятора имеет особое значение** при использовании камней в качестве теплоаккумулирующей среды. Вообще, чем больше расстояние, которое воздуху требуется пройти через камни, тем больше должен быть размер камней для уменьшения перепада давления и снижения необходимой мощности вентилятора. Например, если отсек представляет собой высокий цилиндр (см. рис. 2), то требуются камни большего размера. Если высота цилиндра более 2,5 м, то размер камней должен быть по крайней мере 50 мм; для более высоких цилиндров размер камней должен быть еще больше. Для приземистых, горизонтальных отсеков,



которые обычно устанавливаются в подвалах, может подойти гравий диаметром 25...50 мм (рисунок 5.3).

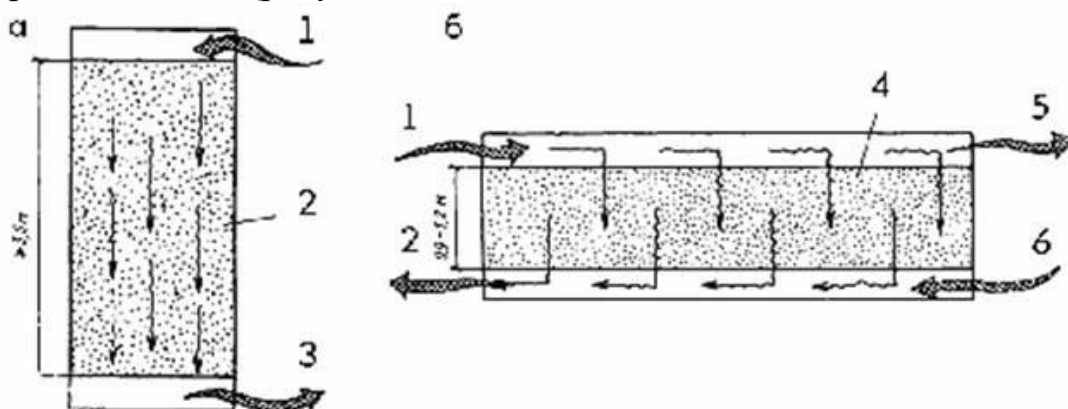


Рисунок 5.3. Форма отсека теплового аккумулятора: а - вертикальный отсек: 1 - теплый воздух из коллектора; 2 - размер камней в поперечнике 50...100 мм; 3 - холодный воздух к коллектору; б - горизонтальный отсек: 1 - теплый воздух из коллектора; 2 - холодный воздух к коллектору; 4 - гравий в поперечнике 25...50 мм; 5 - теплый воздух к дому; 6 - холодный воздух из дома.

## ЖИДКОСТНОЙ ТЕПЛОАККУМУЛЯТОР

Существенным преимуществом жидкостных теплоаккумулирующих систем, содержащих бак-аккумулятор с водой, является их совместимость с солнечным охлаждением. Воду можно использовать **для всех видов солнечного охлаждения**, в том числе и для:

- ночного радиационного охлаждения;
- внепикового охлаждения при помощи небольших компрессоров;
- циклов Ренкина;
- абсорбционного охлаждения.

**Наибольшим преимуществом воды** в качестве теплоаккумулирующей среды является ее сравнительно низкая стоимость (за исключением тех районов мира, где воды мало). Однако с водой связаны некоторые трудности, решение которых может вызвать значительные затраты.

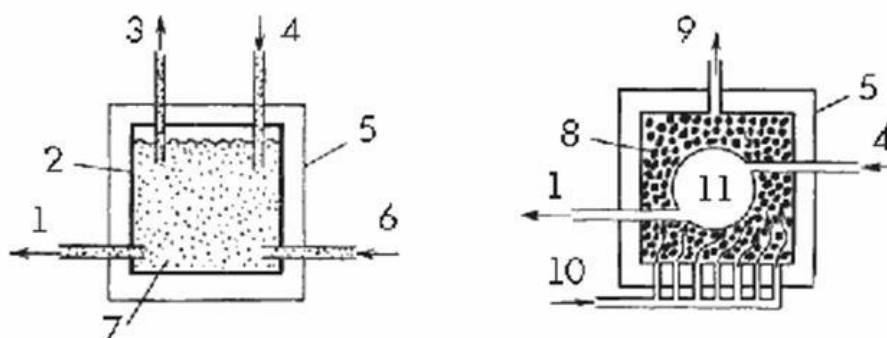
В настоящее время удерживание больших объемов воды (100...350 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> коллектора) стало проще благодаря появлению надежных гидроизоляционных материалов и больших пластиковых листов. Раньше единственным сосудом был бак из оцинкованной стали, который, в конечном счете, протекал. Замена крупных баков, размещенных обычно в подвалах или под землей, является трудным и дорогостоящим делом. Внедрение стеклофутеровки и баков из стекловолокна устранило проблемы коррозии, но увеличило первоначальные затраты.

- На рисунке 5.4 показаны два способа хранения воды:
- наполненный водой бетонный (или шлакоблочный) контейнер;
- система Г. Томасона (бак с водой, окруженный камнями).

В 1-ом способе теплая вода из бака циркулирует в здание либо непосредственно через радиаторы или теплоизлучающие панели, либо косвенно через змеевиковые теплообменники, которые нагревают обтекающий их воздух, охлажденный в помещении.

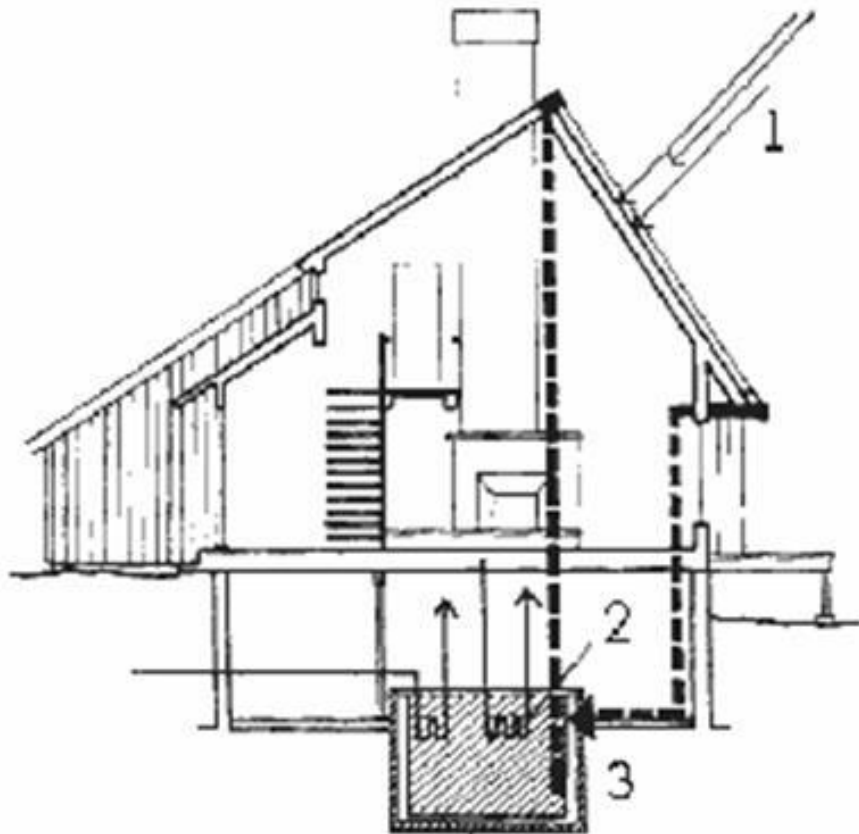
Во 2-ом способе теплоаккумулятор передает тепло медленно, но постоянно от бака с водой камням. Охлажденный в доме воздух медленно циркулирует в больших объемах между нагретыми камнями и возвращается обратно в дом. В обоих случаях самая холодная вода на дне бака поступает в коллектор для подогрева, а затем возвращается в верхнюю часть бака. Эта нагретая в коллекторе вода используется для отопления дома.

На рисунке 5.5 показано поперечное сечение дома. Система солнечного теплоснабжения имеет в своем составе коллектор с открытым стоком воды. Теплообменник отбирает тепло от теплового аккумулятора и передает его в дом через большие стеновые и потолочные радиационные панели, позволяя использовать воду сравнительно низкой температуры. Второй теплообменник подогревает воду для хозяйственных нужд, которая затем поступает в обычный водонагреватель для догрева (при необходимости).



*Рисунок 5.4. Две теплоаккумулирующих системы водяного типа. (Слева - бетонный резервуар, наполненный водой; справа - водяной бак, окруженный камнями): 1 - к коллектору; 2 - гидроизоляционная облицовка; 3 - к радиатору; 4 - из коллектора; 5 - стенка из бетонных или шлакобетонных блоков; 6 - от радиаторов; 7 - вода; 8 - камни размером 70...100 мм с воздушными промежутками; 9 - выпуск теплого воздуха; 10 - впуск холодного воздуха; 11 - бак с водой.*

Большие размеры и высокая стоимость теплообменников могут вызвать серьезные возражения против использования водяных баков-аккумуляторов. 25...50т камней в системе Томасона, хотя и будучи дополнительным тепловым аккумулятором, являются в некотором смысле чересчур внушительным теплообменником. У некоторых типичных металлических теплообменников, погруженных в воду, общая площадь поверхности теплообмена может составлять чуть ли не 1/3 от площади солнечного коллектора



*Рисунок 5.5. Коллекторы с наружным стоком воды и бак-аккумулятор в доме: 1 - коллекторы; 2 - теплообменники для радиационного отопления горячей водой; 3 - теплоаккумулятор.*

**Теплообменники необходимы, когда воду в баке невозможно использовать непосредственно для других целей, кроме аккумуляции тепла.** Например, при использовании в коллекторе раствора антифриза он должен проходить через теплообменник во избежание смешивания его с водой в баке. Кроме того, при расчете теплоснабжения здания инженеры по отоплению обычно требуют, чтобы вода из бака не использовалась в отопительной системе. Это особенно показательно для случая, когда вода из бака циркулирует через коллектор.

Ограничение выбора местоположения для больших баков с водой может оказаться выгодным для проектировщиков здания, не желающих ломать голову над вопросом об оптимальном месте их размещения. Однако, для проектировщика, желающего сделать теплоаккумулятор неотъемлемой частью своего проекта, размещение тяжелого и громоздкого бака может оказаться действительно очень трудной задачей. Естественно, в самосливных системах жидкостного типа тепловой аккумулятор должен находиться ниже дна коллектора, а в термосифонных системах - выше верхней части коллектора. Если теплоаккумуляционная система связана с другим оборудованием, например с отопителем, насосами, теплообменником и бытовыми водонагревателями, то может потребоваться ее близкое размещение к ним.

## **Подземные теплоаккумуляторы солнечной энергии**

Аккумуляирование солнечной энергии в подземных теплоаккумуляторах (ПТА) разрабатывается на основе следующих способов:

- глубокие скважины с закачкой воды;
- глубинные скважины с барботированным слоем жидкости;
- теплообменная твердая засыпка в изолированной подземной полости;
- система концентрических труб, продуваемых воздухом в теплоизолированной подземной полости.

**Разработки подземных теплоаккумуляторов (ПТА) солнечной энергии** ведутся практически во всех развитых капиталистических странах. Заслуживают внимания достижения в этой области в Швеции. В рамках национальной программы по освоению энергетических ресурсов разработан проект теплоснабжения группы коттеджей с помощью солнечной энергии и теплонасосных установок, использующих тепло нагретых грунтовых вод. Система спроектирована для условий района г. Ландскруна (Южная Швеция). Первоначально она намечалась для краткосрочного аккумуляирования тепла, в последующем - для сезонного. Для этого планируется проведение экспериментов с целью определения возможности создания сезонного подземного теплоаккумулятора (ПТА). В скальных породах на глубине 30 м (Швеция) сооружен сезонный подземный теплоаккумулятор солнечной энергии емкостью 100 тыс.м<sup>3</sup>. Его годовая энергоемкость 5500 МВт•ч, что эквивалентно 550 т мазута. Подземный теплоаккумулятор имеет кольцевую форму, его высота 30 м, наружный и внутренний диаметры, соответственно, 75 и 35 м. С помощью солнечной энергии отапливается 550 жилищ. Общая поверхность коллекторов 4,2 тыс.м<sup>2</sup>. Строительные работы длились 7 мес., в том числе самого подземного теплоаккумулятора - 4 мес. Летом и осенью в ПТА поступает нагретая вода до 90°С, а забирается из него с температурой 65-70°С. Среднегодовой КПД 30%, потери тепла неизолированного подземного теплоаккумулятора в конце первого года эксплуатации составят 70%, а через 4 года - 32%, через 10 лет - не превысят 28% (остывание за 25 ч составляет 10°С). Стоимость тепла от подземного теплоаккумулятора эквивалентна стоимости тепла от теплосети. В Швеции разрабатывается проект сезонного ПТА, включающий водоем и подземные горные выработки объемом 700 тыс. м<sup>3</sup>. Нагретая летом вода будет закачиваться в подземный теплоаккумулятор. Теплоаккумулялирующая энергоемкость составит 11-170 ГВт•ч. В отопительный период вода из ПТА поступает в теплосеть; при падении температуры воды ниже 6°С она будет использована в качестве источника тепла для теплонасосных установок.

## 1.5.2 РАСЧЕТ И УСТРОЙСТВО ТЕПЛОАККУМУЛЯТОРА СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

В системах солнечного теплоснабжения применяют как **проточные, так и емкостные теплообменники**.

Расчет теплообменников, включенных в установки солнечного теплоснабжения, выполняют по известным зависимостям, в том числе по выражениям, определяющим понятие эффективности теплообменника ( $\epsilon$  – NTU-метод):

$$\frac{W_T (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})}{W_{\min} (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})} = \frac{W_B (T_{\text{гв}} - T_{\text{хв}})}{W_{\min} (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})} = \epsilon_{\text{то}},$$
$$\epsilon_{\text{то}} = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - R e^{-NTU(1-R)}},$$

где  $\epsilon_{\text{то}}$  – эффективность теплообменника;

$W_T, W_B$  – водяные эквиваленты расходов теплоносителя и воды;

$W_T = G_T c_{\text{рт}}$  и  $W_B = G_B c_{\text{рв}}$ ,

где  $G_T$  и  $G_B$  – расходы теплоносителя и воды;

$c_{\text{рт}}$  и  $c_{\text{рв}}$  – теплоёмкости теплоносителя и воды;

$R = W_{\min} / W_{\max}$  – отношение минимального и максимального из двух водяных эквивалентов расходов теплоносителя и подогреваемой среды, проходящих через теплообменник;

NTU – число единиц переноса тепла ( $T$  – температура,  $U$  – приведенный коэффициент теплопередачи).

Трудность расчета теплообменников при проектировании установок солнечного теплоснабжения связана с тем, что они работают при переменных температурах, а часто и непостоянных расходах теплоносителей. Поэтому для практических расчетов можно использовать упрощенные зависимости для определения необходимых площадей теплообмена:

$$F_{\text{то}} = \frac{G_{\text{ср}} (T_{\text{гв}} - T_{\text{хв}})}{3600 \tau \Delta T k},$$

где  $G_{\text{ср}}$  – количество воды, нагреваемой за период работы установки, кг;

$\tau$  – продолжительность суточного цикла работы установки, ч;

$\Delta T$  – средний температурный напор в теплообменнике, °С;

$k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$F_{\text{то}}$  – площадь поверхности нагрева, м<sup>2</sup>;

$T_{\text{гв}}, T_{\text{хв}}$  – температуры горячей и холодной воды.

**Тепловой расчет баков-аккумуляторов** выполняют по балансовым уравнениям.

Теплоаккумулятор призван накопить излишнее тепло, выработанное солнечным коллектором, и равномерно распределить его в течении суток или даже нескольких дней. Делать солнечный коллектор без какого либо теплового аккумулятора нет большого смысла (разве что в расчете на тепловую инерционность дома). Но по логике, **следует делать такой комплекс из теплового аккумулятора и солнечного коллектора, который бы обеспечивал бы дом теплом хотя бы одну ночь (после солнечного дня или хотя бы нескольких солнечных часов). А лучше - в течении нескольких дней после хотя бы одного солнечного дня.**

Вместе с тем, не стоит наивно надеяться только на солнечный обогрев в условиях продолжительного пасмурного периода, короткого светового дня и маленького угла наклона Солнца, так как солнечный обогрев в этот период осуществить весьма проблематично. Поэтому **солнечный обогрев следует воспринимать как способ экономии расходов на отопление, а не полную альтернативу традиционному отоплению.**

**Теплоаккумулятор должен представлять из себя достаточно теплоемкое устройство, способное быстро аккумулировать тепловую энергию, достаточно долго его хранить и отдавать по требованию.** Его теплоемкость должна соответствовать как мощности солнечного коллектора, так задачам, стоящим перед теплоаккумулятором. Вообще говоря, на Руси пользовались теплоаккумулятором издревле. Всем известна так называемая «русская печь». Это несколько тонн кирпича и достаточно большая камера для горения дров. Будучи интенсивно протоплена в течении нескольких часов, такая печь хранила тепло несколько суток! Чем вам не теплоаккумулятор?

**Конструкция теплоаккумулятора определяется физикой процесса.** Из солнечного коллектора поступает воздух с температурой 40...60 градусов. Этим воздухом обдувается рабочее тело теплоаккумулятора. Оно нагревается и когда надо, через него начинают продувать воздух, который затем направляют на обогрев помещений.

**Давайте рассчитаем, сколько тепла сможет выработать солнечный коллектор** (его условный квадратный метр) и какой теплоаккумулятор должен ему соответствовать. Допустим, солнечный коллектор эффективно освещается солнцем  $\tau=6$  часов. За это время на него падает при средней мощности коллектора в  $q=5\text{кВт/м}^2$  тепловой энергии:

$$Q=q \tau = 0,005 \cdot 6 \cdot 3600 = 108\text{МДж.}$$

Посмотрим, как нам лучше запасти эту энергию (КПД мы пока не учитываем).

В подавляющем большинстве случаев авторы всевозможных проектов рекомендуют использовать каменно-гравийные теплоаккумуляторы. Это достаточно разумно. Материал вечный, никаким воздействиям не подвержен.

Ничего не боится. Но теплоемкость камня  $c_k = 0,8 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град.})$  Что бы запасти всю энергию от солнечного коллектора, нам потребуется примерно следующее количество 750 кг камней (при условии, что исходная температура камней была  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и нагрели его до  $t_2 = 90^\circ\text{C}$ ):

$$M = Q / [c_k (t_2 - t_1)] = 108000 / [0,8 (90 - 20)] = 1929 \text{ кг}$$

1929 кг. это не много, где-то 0,77...0,82 кубометра. Но запасенного тепла нам хватит на отопление площади (из расчета  $p = 100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ):

$$F = q \tau / (24 p) = 5000 \cdot 6 / (24 \cdot 100) = 12,5 \text{ м}^2.$$

(и это без учета КПД и всевозможных потерь).

А что бы запасти тепла на сутки для дома в  $100 \text{ м}^2$ , нам потребуется соответственно в 8 раз больший солнечный коллектор и в 8 раз больший теплоаккумулятор. То есть солнечный коллектор в  $8 \text{ м}^2$  и аккумулятор на 15,4 тонн ( $6,2 \text{ м}^3$ ). Такой теплоаккумулятор будет занимать площадь при высоте 1 м в  $6,2 \text{ м}^2$  ( $2 \times 3,1 \text{ м}$ ). И это всего лишь ради отопления на 1 сутки.

Если солнечная погода стоит несколько дней подряд, можно было бы запасти тепла по больше, но второй закон термодинамики гласит, тепло не передается от более холодного тела к более тепловому в обычных условиях. То есть как только теплоаккумулятор нагреется до температуры обдувающего его воздуха, он перестанет поглощать и накапливать тепло. Сделать теплоаккумулятор более теплоемким можно либо дальнейшим его наращиванием по объему, либо применением более теплоемких материалов.

**Самым теплоемким (и бесплатным) материалом является вода.** Ее теплоемкость  $c_v = 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ . Это в 5,25 раз больше, чем у камня. То есть для того условного метра солнечного коллектора нам потребуется не 1929 кг камня, а примерно 367 литров воды. (для суточного аккумулятора и 8 метрового солнечного коллектора соответственно около 3 тонн воды.). Объем водяного аккумулятора  $3 \text{ м}^3$ . Он будет занимать площадь при высоте 1 м в  $3 \text{ м}^2$  ( $2 \times 1,5 \text{ м}$ ).

Но если организовать теплообмен между воздухом и камнями проще простого (проложил воздуховод и завалил его камнями, воздух будет проходить в щели между камнями и обмениваться с ним теплом). То сделать теплообменник между водой и воздух гораздо сложнее. Однако тут есть весьма интересное и остроумное решение - **создать искусственные камни с теплоемкостью воды!** Как? Да разлить воду по пластиковым ПЭТ бутылкам и канистрам! Многочисленные зазоры между ними будут тем самым теплообменником вода-воздух.

Конечно, бутылок и канистр потребуется весьма много для нескольких десятков тонн воды, но зато не потребуется делать никакого теплообменника.

Разумеется, человек, задумавший устроить у себя солнечное отопление из коллектора и теплоаккумулятора, скорее всего будет исходить не из того, что надо или хочется, а из того, что он может себе позволить сделать. Если есть крыша определенного размера, из которой можно сделать солнечный коллектор, то вряд ли он будет делать солнечный коллектор специально (большего размера или в стороне от дома). То же и с теплоаккумулятором. Это ведь не бочка с водой для садового душа. Тут счет идет на кубометры. И устроить теплоаккумулятор с бухты – барахты вряд ли удастся. Место для него надо заранее резервировать на стадии проектирования дома.

Итак, допустим, согласно проекта под теплоаккумулятор выделяется примерно 60...65 кубометров подвала. Тут можно будет разместить около 50 тонн воды (в канистрах по 10...20 литров и т.п.) В теплооборот будут так же включены примерно 30 куб. метров бетона (ок. 50 тонн) составляющих стены подвала теплоаккумулятора (их планируется утеплить с другой стороны для уменьшения теплопотерь аккумулятора).

Таким образом, максимальная теплоемкость такого теплоаккумулятора (для перепада температур в 40 градусов) составит:

$$50000 \text{ кг} \cdot 4,2 \text{ кДж} \cdot 40 + 50000 \text{ кг} \cdot 0,8 \text{ кДж} \cdot 40 = 10000 \text{ МДж (10ГДж)}.$$

Это эквивалентно сжиганию примерно 600...1000кг отборных дров (1,5...2 кубометра). Больше этого количества тепла невозможно запасти даже теоретически. Если учесть что для часового отопления требуется порядка  $100\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ , ( $0,36 \text{ МДж}/\text{м}^2$ ), то этим теплом можно обогреть:

$$10000/0,36 = 27800\text{м}^2.$$

Это либо отапливать  $100\text{м}^2$  в течении 270 часов, либо  $200 \text{ м}^2$  в течении 135 часов, либо  $25 \text{ м}^2$  в течении 1000 часов и т.д.).

Разумеется это зависит от конструкции дома и организации теплоаккумулятора и системы воздушного отопления.

Теперь рассчитаем, **за какое время наш солнечный коллектор сможет нагреть этот теплоаккумулятор.** Солнечный коллектор теоретически может иметь площадь до  $100\text{м}^2$ . Допустим, с каждого метра сможем снимать по 500Вт энергии в 1час. (это примерно 1,8МДж за 1час работы). Соответственно со всего коллектора за 1час мы получим 180МДж.

Что бы зарядить весь теплоаккумулятор «по самую крышку» соответственно потребуется  $10000 / 180 = 55...60$  солнечных часов. В реальности - гораздо больше, так как у теплоаккумулятора есть и теплопотери. Возможно, в реальности он никогда и не зарядится на полную силу.

Получить 60 солнечных часов подряд, как понимаете, совершенно невозможно. Максимальное время, в течении которого солнечный коллектор – крыша будет работать – это 5..6 часов в лучшем случае. Крыша ориентирована на юг и утром и вечером ждать от нее эффективной работы не



стоит. Но за 5...6 часов она способна выдать около 1000МДж тепла (то есть зарядить теплоаккумулятор всего на 1/10 его емкости).

Напрашивается вывод: **Необходимо разделить теплоаккумулятор на несколько отделов.** Тогда можно будет управлять им по значительно более гибкому алгоритму. Если солнечный день - случайность, и их всего 1...2, то в течении его и зарядить 1...2 отдела (например 20%) аккумулятора. Зато практически полностью. Если же установилась хорошая погода надолго, то последовательно заряжать все остальные отделы теплоаккумулятора. Так же следует и расходовать тепловую энергию, по очереди «разряжая» отделы аккумулятора.

Для такой организации отделы должны быть серьезно теплоизолированы друг от друга, но иметь возможность объединяться. Гибкая система управления позволит наиболее полно использовать потенциал солнечного отопления.

Другой вывод, который можно сделать из вышеприведенных расчетов: При правильной организации солнечного коллектора и теплоаккумуляторы один условный квадратный метр солнечного коллектора за один свой «рабочий час» (когда он освещен солнцем) вырабатывает тепловую энергию в количестве достаточном для отопления с коэффициентом 5...8. (Для условной величины расходов на отопление 100Вт/м<sup>2</sup>). Чем лучше утеплен дом, более качественно устроен тепловой коллектор, теплоаккумулятор и коммуникации, тем выше будет этот коэффициент.

Можно даже вывести простую формулу некоего теплового баланса:

$$K_k \cdot S_{ск} \cdot T_{солн.} = S_{от} \cdot T_{об},$$

где  $K_k$  - коэффициент конверсии тепла, 5...8 (не более 8 принципиально при КПД 100%);

$S_{ск}$  - площадь солнечного коллектора (м<sup>2</sup>);

$T_{солн.}$  - время эффективного освещения коллектора солнцем. (часы);

$S_{от}$  - обогреваемая площадь помещения (м<sup>2</sup>);

$T_{об}$  - время обогрева помещения (час.).

Исходя из своих возможностей или потребностей и располагая определенными исходными данными, можно рассчитать все остальные параметры солнечного обогрева.

Например, у вас есть возможность сделать солнечный коллектор площадью 10м<sup>2</sup>, который будет освещен в течении 5 часов. Получим:

$$(5.. 6) \cdot 10 \cdot 5 = 250...300.$$

Соответственно, мы сможем отапливать 25м<sup>2</sup> в течении 10...12 часов. Или 10м<sup>2</sup> в течении суток (24ч).

Очевидно, что имея небольшой солнечный коллектор, нет смысла закладывать на отопление всего дома. Лучше качественно обогреть одно помещение. Это уже даст существенную экономию топлива или электроэнергии.

### **Контрольные вопросы**

1. С чем в первую очередь связано практическое применение различных типов тепловых аккумуляторов?
2. Достоинства аккумуляторов, использующих тепловые эффекты обратимых фазовых переходов (АФП).
3. Чем характеризуется сорбционное аккумулирование тепловой энергии?
4. Чем характеризуется косвенное аккумулирование тепловой энергии?
5. Чем характеризуется прямое аккумулирование тепловой энергии?
6. Классификация тепловых аккумуляторов проводится в соответствии с какими главными признаками?
7. Какова плотность энергии в аккумуляторах на основе обратимых химических реакций (так называемые термохимические аккумуляторы - ТХА)?
8. Биологическое аккумулирование энергии. Водород. Аммиак.
9. Способы создания подземных теплоаккумуляторов солнечной энергии.
10. С чем связана трудность расчета теплообменников при проектировании установок солнечного теплоснабжения?

## 1.6 Практическое занятие 6. Переработка растительных отходов

### 1.6.1 Простое сжигание древесных отходов

С помощью тепла сжигаемой биомассы готовят пищу, обогревают жилище, осуществляют целый ряд технологических процессов при переработке урожая. Его используют для получения электроэнергии, необходимой для работы различной техники.

В большинстве развивающихся стран сжигание биомассы обеспечивает покрытие наибольшей доли потребности в топливе. Совершенно иначе обстоит дело в промышленно развитых странах: здесь доминирует использование ископаемого топлива и в некоторых случаях – атомной энергии.

В таблице 6.1 приведены данные по теплоте сгорания ряда обезвоженных пригодных для нужд энергетики культур, биологических отходов, производных топлив и органических продуктов, полезные при оценке возможностей промышленного использования топлив из биомассы.

**Технология прямого сжигания** представляет собой наиболее очевидный способ извлечения энергии из биомассы. Она проста, хорошо изучена и коммерчески доступна. Существует множество типов и размеров систем прямого сжигания, в которых можно сжигать различные виды топлива: древесное топливо, соломенные тюки, твёрдые бытовые отходы, автомобильные шины и т.п.

**Под древесным топливом** понимают все виды топлива, полученные в лесном хозяйстве. Древесина добывается на постоянной основе: в лесах в процессе вырубki. В процессе прореживания лесных плантаций создается большое количество древесных отходов. Сегодня они зачастую остаются гнить на месте. Это происходит даже в странах, в которых ощущается недостаток топлива. Древесные отходы могут быть собраны, высушены и использованы в качестве топлива.

Следующим источником древесных отходов является обработка деловой древесины. Сухие опилки и другие отходы, возникающие в процессе распиловки деловой древесины и изготовления мебели, представляют собой качественное топливо.

**Сельскохозяйственные отходы** представляют собой огромный источник биомассы для прямого сжигания. Отходы растениеводства и животноводства обеспечивают значительное количество энергии, уступающее только древесине, которая является главным видом топлива из биомассы на Земле. Сельскохозяйственные отходы включают: отходы растительных культур, например, солому, некондиционную продукцию и излишки производства.

**Сжигание биомассы** (например, древесины) может быть разбито на 4 фазы:

испарение воды, содержащейся в древесине. Даже древесина, высушенная в течение нескольких лет, содержит от 15 до 20% воды в клеточной структуре;

выделение газовой (летучей) составляющей. Очень важно, чтобы эти газы сгорали, а не «вылетали в трубу»;

выделяющиеся газы смешиваются с атмосферным воздухом и сгорают под воздействием высокой температуры;

сгорание остатков древесины (преимущественно углерод).

Таблица 6.1 - Теплотворные способности различных топлив, МДж/кг

Топливо	Теплота сгорания	Примечание
<b>Специально собираемое</b>		
Древесина:		
зелёная	8	Зависит больше от влажности, чем от сорта дерева
сезонная	13	
специально высушенная	16 - 20	-
Растительность высушенная	15	Например, сено
<b>Отходы урожая</b>		
Солома	17	Для сухого материала
Пшеничная шелуха	12 – 15	
Стебли кукурузы	17	
<b>Вторичные биотоплива</b>		
Этанол – $C_2H_5OH$	30	Плотность 789кг/м <sup>3</sup>
Метанол – $CH_3OH$	23	-
Биогаз	28	50% $CH_4$ + 50% $CO_2$
Генераторный газ	5 - 10	Различный состав
Древесный уголь:		
твёрдый кусковый	32	-
пылевидный	32	-
<b>Ископаемые топлива</b>		
Метан	55	Природный газ
Бензин	47	Продукты переработки нефти
Керосин	46	
Дизельное топливо	46	
Сырая нефть	44	-
Чёрный уголь	27	Коксующийся

При хорошем сгорании энергия используется почти полностью. Всё зависит от устройства, в котором она сгорает и от температуры продуктов сгорания, которые покидают это устройство. Если эта температура ниже «точки росы», то всё тепло, что было затрачено на испарение влаги и тепло от полученного в результате горения водяного пара полезно используется. Такие устройства называются конденсационными котлами. Каждый килограмм пара при конденсации выделяет 2,5 МДж тепла. Единственным остатком от сжигания древесных отходов является небольшое количество золы.

Тепло, получаемое при сжигании биомассы, может использоваться для приготовления пищи, отопления и горячего водоснабжения, для производства электроэнергии и в промышленных процессах.

Одной из проблем, связанных с непосредственным сжиганием в устройствах для приготовления пищи, является их низкая эффективность. В случае использования открытого пламени часть тепла теряется.

Соответствующие устройства имеют КПД до 20%.

Пар для обеспечения производства обычно получают, сжигая различные отходы биомассы в топках паровых котлов. При этом возможно **использование метода сжигания в псевдоожигенном слое.**

Большое значение имеет удельный объем топлива, который определяет размеры соответствующего оборудования и технологию сжигания. В этом отношении древесина значительно уступает, например, углю. Для угля **удельный объем** составляет около  $30 \text{ дм}^3/\text{ГДж}$ , тогда как для щепы, в зависимости от породы дерева, этот показатель лежит в пределах  $250 \dots 350 \text{ дм}^3/\text{ГДж}$ ; для соломы удельный объем еще больше, достигая  $1 \text{ м}^3/\text{ГДж}$ . Поэтому **сжигание биомассы требует либо ее предварительной подготовки, либо специальных топочных устройств.** В частности, в ряде стран распространение получил **способ уплотнения древесных отходов с превращением их в гранулы.**

В последнее время наибольшее распространение получили котлы с автоматической подачей биотоплива в зону горения. **Автоматические котлы** подключаются к системе теплоснабжения так же, как мазутные или газовые. Тепло от сгорания топлива передается теплоносителю - воде, которая после нагрева поступает в радиаторы, расположенные в помещениях дома. Таким образом, котел отапливает все помещения в здании, в отличие от печи, которая обогревает лишь комнату, в которой находится. Гранулы (рисунок 6.1) и щепа (рисунок 6.2) имеют идеальный размер для использования в автоматических котлах, поскольку они подаются в котел непосредственно из бункера. Бункер необходимо заполнять один-два раза в неделю. В котлах с ручной подачей топлива, использующих, например, дрова, последние необходимо загружать несколько раз в день.

Древесные гранулы являются относительно новым и привлекательным видом топлива. При сжигании гранул утилизируются ресурсы, которые в противном случае оказались бы в составе мусора или попали бы на свалки. Гранулы обычно делаются из отходов (опилок и стружек) и используются в широких масштабах в системах централизованного теплоснабжения. Они производятся прессованием и имеют  $1 \dots 3$  см в длину и около 1 см в диаметре. Они чистые, обладают хорошим запахом и приятные на ощупь. Гранулы имеют низкую влажность (менее 10%) и высокую теплотворную способность ( $16,2 \dots 18,72 \text{ кДж/кг}$ ) по сравнению с другими видами древесного топлива.

После прессования уменьшается объем (плотность более  $650 \text{ кг/м}^3$ ), в результате увеличивается количество энергии в единице объема

(энергетическая плотность). При сжигании гранул процесс обладает большей эффективностью и образуется малое количество остатка.



*Рисунок 6.1. Древесные гранулы*



*Рисунок 6.2. Приготовление древесной щепы рубительной машиной*

Существует много преимуществ использования древесных гранул в качестве топлива. Для производства гранул не нужно пилить деревья - они могут быть получены из древесных отходов. Сжигание гранул помогает избавиться от отходов деревообрабатывающей и мебельной промышленности. В гранулах обычно отсутствуют добавки для улучшения процесса горения. При сжигании гранул не образуется вредный дым.

Использование этого вида топлива уменьшает потребность в ископаемом топливе, сжигание которого приносит вред окружающей среде.

Древесная щепа получается из отходов лесной древесины. Древостой должен прореживаться при выращивании деловой древесины (для

производства балок, досок и мебельных заготовок). Таким образом, **щепа является результатом обычной эксплуатации лесного хозяйства.**

Древесина измельчается в специальных рубительных машинах (рисунок 6.3). Приготовление древесной щепы представлено на рисунок 6.2. Размер и вид щепы зависит от конкретной машины, однако типичная щепа имеет от 2 до 5 см в длину и 1 см в толщину. Влажность свежей щепы составляет около 50% (массовых) и значительно уменьшается в процессе сушки.



*Рисунок 6.3. Рубительная машина*

### **Котлы, работающие на щепе и гранулах**

Существует три типа котлов с автоматической подачей для щепы и гранул:

- компактные устройства, в которых котел и бункер объединены;
- устройства с питателем, в которых котел и бункер отделены друг от друга;
- котлы с предтопком.

В компактных устройствах топливо подается из бункера с помощью автоматического питателя (рисунок 6.4). Количество подаваемого топлива определяется автоматически с помощью термостата. Если вода в котле имеет низкую температуру, подается больше топлива, и наоборот. Компактные устройства прекрасно работают на гранулах. Они менее приспособлены для щепы, которая имеет меньшую энергетическую плотность. Для щепы загрузка топлива должна проводиться слишком часто. Кроме того, влажность щепы нередко бывает слишком высокой, в результате ее сгорание происходит неоптимальным образом.



Рисунок 6.4. Котёл и бункер объединены

В котлах с питателем топливо также подается автоматически из бункера с помощью шнекового конвейера (рисунок 6.5). Топливо подается в нижнюю часть решетки, где и происходит сгорание. Контроль подачи топлива также осуществляется с помощью термостата.

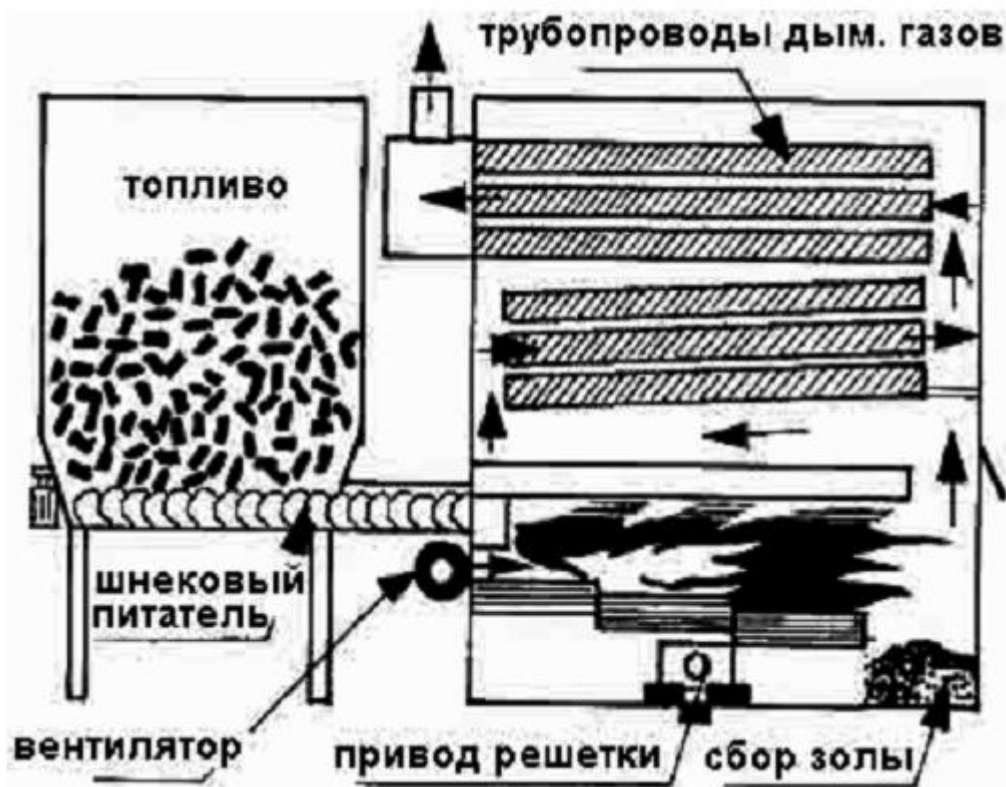


Рисунок 6.5. Котёл с питателем



Лучшим видом древесного топлива являются гранулы, однако сжигание щепы также возможно в устройствах, разработанных специально для щепы.

Щепа при этом не должна быть слишком влажной, поэтому **необходима ее предварительная сушка**. Лучшим способом сушки является выдерживание древесины в проветриваемых помещениях перед измельчением в рубительной машине.

Щепа также может сушиться после рубки, по крайней мере, в течение двух месяцев. Для этой цели необходимо значительное пространство для ее хранения.

**В котлах с предтопком** сжигание топлива в основном происходит при высокой температуре в предтопках (рисунок 6.6). Для поддержания высокой температуры предтопки имеют шамотную обмуровку. Котлы с предтопком пригодны для сжигания влажной древесной щепы. Не сгоревшие в предтопке газы дожигаются в котле. В таких котлах могут сжигаться и гранулы,

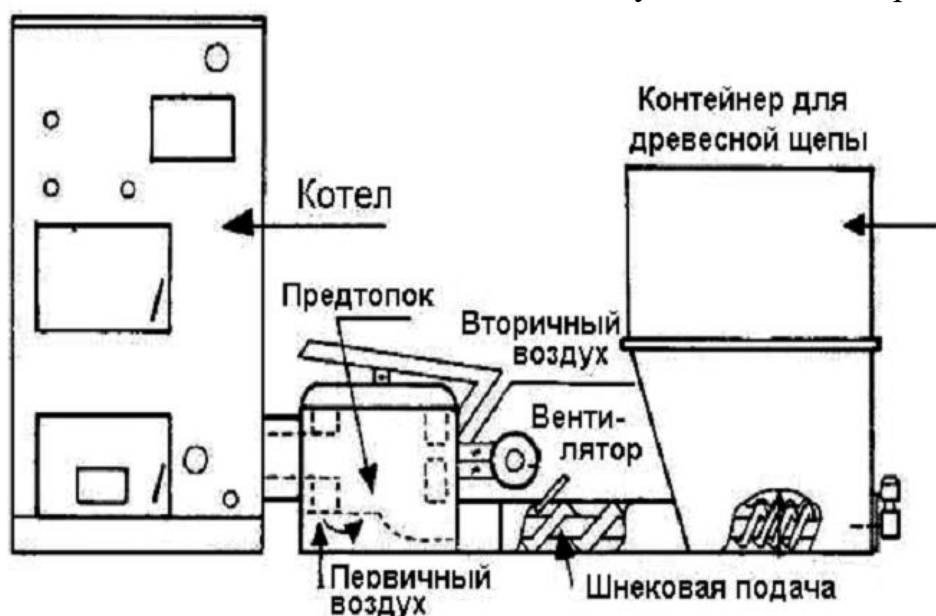


Рисунок 6.6. Котёл с предтопком

## 1.6.2 ПИРОЛИЗ И ГАЗИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Пиролиз определяется как процесс, при котором органическое сырье подвергается нагреву или частичному сжиганию для получения производных топлив или химических соединений. Пиролиз использовался в течение столетий для получения древесного угля.

**Традиционный пиролиз с целью получения древесного угля** заключается в нагреве исходного материала (древесины) в условиях почти полного отсутствия воздуха, обычно до температуры 300...500°C до полного удаления летучей фракции (газов и паров). Остаток, известный под названием древесный уголь, имеет двойную энергетическую плотность по

сравнению с исходным материалом и сгорает при значительно более высоких температурах. В зависимости от влажности и эффективности процесса, 4...10 тонн древесины требуется для производства 1 тонны древесного угля. Так как летучие вещества не собираются, **древесный уголь содержит две трети энергии исходного сырья.**

**Продуктами пиролиза**, осуществляемого на современных установках, являются газы, жидкий конденсат в виде смол и масел, твердые остатки в виде древесного угля и золы. Изначальным сырьем могут служить древесина, отходы биомассы и твердые бытовые отходы.

**Установка для осуществления пиролиза** приведена на рисунке 6.7. Наиболее предпочтительными считаются вертикальные устройства, загружаемые сверху.

**КПД пиролиза** определяется как отношение теплоты сгорания производного топлива к теплоте сгорания используемой в процессе биомассы. В лучших установках он достигает 80...90%.

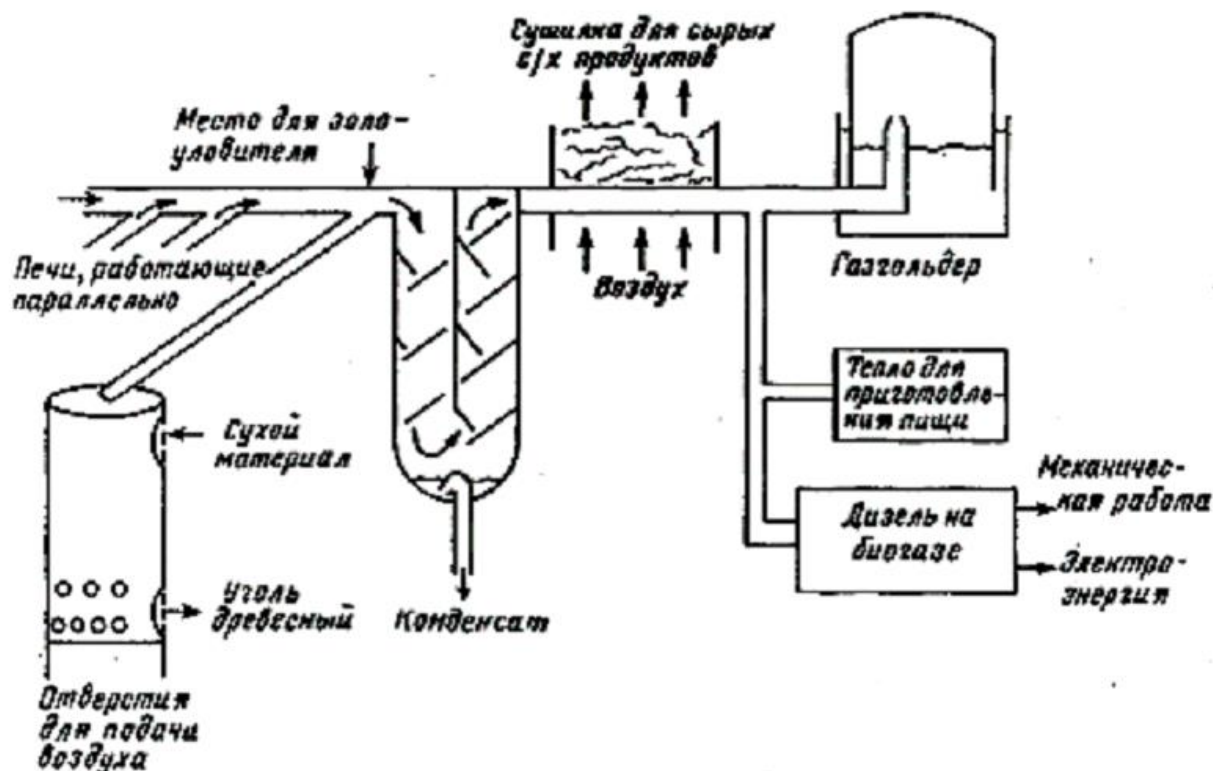


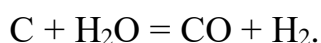
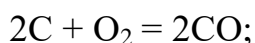
Рисунок 6.7. Установка для осуществления пиролиза

Для получения максимального выхода именно горючих газов применяют **газификацию биотоплива** – превращение твердого биотоплива (чаще всего древесины) в горючие газы путём неполного окисления продуктов воздухом (кислородом, водяным паром) при высокой температуре.

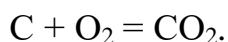
**В процессе газификации древесины** образуется горючий газ, представляющий собой смесь водорода  $H_2$ , монооксида углерода  $CO$ , метана  $CH_4$  и некоторых негорючих сопутствующих компонентов.

**Газификацию биотоплив** проводят в **газогенераторах**, получаемые газы называются генераторными. Их применяют как топливо в бытовых газовых приборах, двигателях внутреннего сгорания и др. Используя газы этого процесса для работы приводных машин (ДВС, газовых турбин) электрических генераторов при производстве электроэнергии, можно достигать более высокой эффективности, чем при использовании паровых котлов с паровыми турбинами. Подобные устройства пригодны для мелкомасштабной электроэнергетики (менее 150кВт).

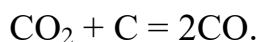
При газификации твердого биотоплива (древесина и др.) окислению кислородом или водяным паром подвергается непосредственно углерод:



Однако весь углерод превратить в целевой продукт CO обычно не удается, часть его сгорает полностью для получения тепла, идущего на проведение выше перечисленных реакций:



Образовавшийся при этом углекислый газ, в свою очередь, реагирует с раскаленным углеродом:



Для получения генераторных газов применяют **различные виды окислителей (дутья):**

воздух;

смесь водяного пара с воздухом или кислородом;

воздух, обогащённый кислородом и др.

**Состав дутья** подбирается так, чтобы тепла, выделяющегося в экзотермических реакциях, хватило для осуществления всего процесса.

Горение твёрдого биотоплива в газогенераторе в отличие от любой другой топки осуществляется в большом слое и характеризуется поступлением **количества воздуха, недостаточного для полного сжигания** топлива. Например, при работе **на паровоздушном дутье** в газогенератор подается 33...35% воздуха от теоретически необходимого.

Образующиеся в газогенераторе газы содержат **продукты полного горения топлива (углекислый газ, водяные пары)** и продукты их восстановления, неполного горения и пирогенетического разложения топлива (**угарный газ, водород, метан, углерод**). В генераторные газы переходит также **азот воздуха**.

Газогенератор обычно представляет собой шахту, внутренние стенки которой выложены огнеупорным материалом (шамотным). Сверху этой шахты загружается топливо, а снизу подаётся дутьё. Слой топлива поддерживается **колосниковой решеткой**. Процессы образования газов в слое топлива газогенератора показаны на рисунке 6.8.

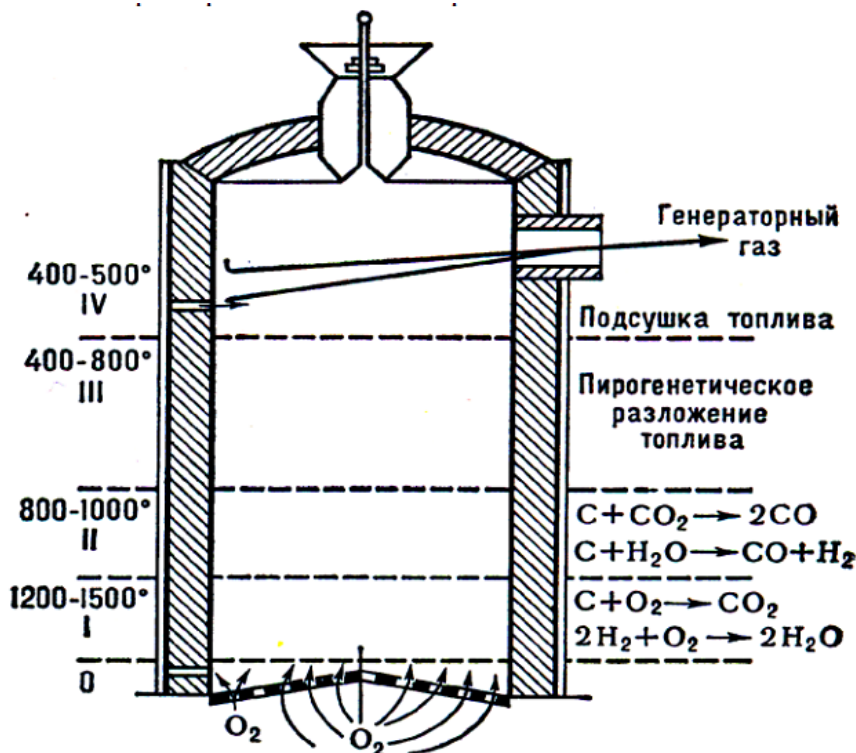


Рисунок 6.8. Схема процесса образования газа в газогенераторе

Подаваемое в газогенератор дутьё вначале проходит через **зону золы и шлака O**, где оно немного подогревается, а далее поступает в раскалённый слой топлива (окислительная зона, или **зона горения I**), где кислород дутья вступает в реакцию с горючими элементами биотоплива и выделяется необходимое для поддержания требуемой температуры тепло. Образовавшиеся продукты горения, поднимаясь вверх по газогенератору и встречаясь с раскалённым топливом (**зона газификации II**), восстанавливаются до окиси углерода и водорода. При дальнейшем движении вверх сильно нагретых продуктов восстановления происходит термическое разложение топлива (**зона разложения топлива III**) и продукты восстановления обогащаются продуктами разложения (газами, смоляными и водяными парами). В результате разложения топлива образуются вначале полукокс, а затем и кокс, на поверхности которых при их опускании вниз происходит восстановление продуктов горения (**зона II**). При опускании ещё ниже происходит **горение кокса (зона I)**. В верхней части газогенератора происходит **сушка топлива теплом поднимающихся газов и паров**.

В зависимости от того, в каком виде подаётся в газогенератор кислород дутья, состав генераторных газов изменяется. При подаче в газогенератор одного воздушного дутья получается **воздушный газ**, теплота горения

которого (в зависимости от исходного топлива) колеблется от 3,8 до 4,5 МДж/м<sup>3</sup> (газ разбавлен азотом воздуха). Применяя дутьё, **обогащённое кислородом**, получают так называемый **парокислородный газ** (содержащий меньшее количество азота, чем воздушный газ), теплота горения которого может быть доведена до 5...8,8 МДж/м<sup>3</sup>.

При работе газогенератора на воздухе с умеренной добавкой к нему водяных паров получается **смешанный газ**, теплота сгорания которого (в зависимости от исходного топлива) колеблется от 5 до 6,7 МДж/м<sup>3</sup>. И, наконец, **при подаче в раскालённый слой топлива газогенератора водяного пара** получают **водяной газ** с теплотой сгорания от 10 до 13,4 МДж/м<sup>3</sup>.

### 1.6.3 ГИДРОЛИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целлюлоза, составляющая основную массу сухого остатка растений, трудно поддается биохимической переработке - сбраживанию с помощью микроорганизмов. Поэтому её обрабатывают химически для того, чтобы получить исходный материал для спиртовой ферментации, предназначенной для получения этилового спирта С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>ОН – высокоэнергетического жидкого топлива, которое может использоваться вместо бензина в двигателях автомобилей.

**Превращение целлюлозы в сахара**, которые могут сбраживаться, возможно путём измельчения и химической обработки целлюлозы в присутствии катализаторов - горячих минеральных кислот. Этот **процесс химического взаимодействия полисахаридов непищевого растительного сырья с водой в присутствии катализаторов называется гидролизом растительных материалов**.

Исходное растительное сырьё (отходы лесозаготовок, лесопиления и деревообработки, а также отходы сельского хозяйства) обычно содержит до 75% нерастворимых в воде полисахаридов в виде целлюлозы и гемицеллюлоз, при разложении которых вначале образуются промежуточные соединения, а затем **простейшие сахара – монозы**. Наряду с образованием моноз происходит и их частичный распад с образованием органических кислот, гуминовых кислот и других веществ. **Скорость гидролиза растёт с увеличением температуры и концентрации кислоты**.

Гидролиз растительных материалов является основой гидролизных производств, служащих для получения важных пищевых, кормовых и технических продуктов. В производственных условиях продуктами гидролиза растительных материалов являются **гидролизаты – растворы моноз (пентоз и гексоз, в частности глюкозы), летучие вещества (органические кислоты, спирты) и твёрдый остаток - гидролизный лигнин**.

Выход моноз может достигать 90% от полисахаридов.

Гидролизаты подвергают дальнейшей биохимической переработке для получения требуемых видов товарной продукции.

Аппараты для проведения реакции гидролиза называются **гидролизёрами**, которые бывают периодического и непрерывного действия. Первые в свою очередь делятся на аппараты, работающие **при атмосферном давлении (заварные чаны)** и **при повышенном давлении (конверторы)**. В заварном чане вода и кислота доводятся до интенсивного кипения. Длительность заварки с целью получения гидролизатов 4...4,5 часа.

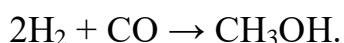
**В конверторах гидролиз ведётся** при повышенных температуре и давлении и продолжается всего 18 – 20 минут.

**Гидролизеры непрерывного действия имеют ряд преимуществ:**  
непрерывность процесса, позволяющая регулировать скорость получения гидролизатов с целью повышения их качества;  
более равномерное потребление пара;  
сокращение расхода топлива.

Гидролиз в аппаратах непрерывного действия продолжается 8 – 10 минут.

**Один из важнейших продуктов гидролизного производства – этиловый спирт**, который также получают биохимическим путём – сбраживанием гексоз гидролизатов. Значение гидролизного производства заключается прежде всего в том, что используются огромные ресурсы растительных отходов для производства ценной продукции - этилового спирта, на выпуск которого в других отраслях промышленности расходуется значительное количество пищевых и кормовых продуктов (зерно, картофель, патока и др.). Современный уровень технологии позволяет получать методом гидролиза **из одной тонны сухого древесного сырья 175 литров этилового спирта и 35 килограмм кормовых белковых дрожжей.**

**Метиловый спирт (метанол)  $\text{CH}_3\text{OH}$**  – ядовитая жидкость, получается в процессе каталитической реакции между водородом  $\text{H}_2$  и окисью углерода  $\text{CO}$  при температуре  $330^\circ\text{C}$  и давлении 15МПа:



Водород и окись углерода – компоненты синтетического газа - могут получаться при газификации биомассы. Метанол можно использовать в качестве заменителя бензина с теплотой сгорания 23МДж/кг.

#### **1.6.4 СПИРТОВАЯ ФЕРМЕНТАЦИЯ (БРОЖЕНИЕ)**

Спиртовая ферментация относится к биологическому преобразованию биомассы. **Ферментация представляет собой процесс, в котором сахар превращается в этиловый спирт (этанол)  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$**  под воздействием

микроорганизмов (обычно дрожжей) в кислой среде (рН – от 4 до 5). Дрожжи погибают при концентрации спирта выше 10%, поэтому для **повышения концентрации используют перегонку или фракционирование** (рисунок 6.9).

**После перегонки (дистилляции)** получается кипящая при постоянной температуре смесь: 95% этанола и 5% воды.

Обезвоженный этанол в промышленных условиях производится путём совместной перегонки с растворителем типа бензола. Энергетическое содержание конечного продукта около 30МДж/кг. При брожении теряется лишь 0,5% энергетического потенциала сахаров, остальные затраты энергии связаны с перегонкой.

Потери энергии в процессе дистилляции значительны, однако этот недостаток компенсируется удобством использования и транспортировки жидкого топлива, относительно низкой ценой и доступностью технологии. **Необходимую тепловую энергию или её часть можно получить, сжигая остающиеся отходы биомассы (лигнин).**

**Производство топливного этанола** (рисунок 6.10) с помощью ферментации состоит из **четырёх этапов**:

выращивание, сбор и доставка сырья на спиртовой завод;

подготовка и преобразование сырья в субстрат, пригодный для ферментации;

ферментация субстрата с получением этанола, очистка методом дистилляции;

переработка остатков после ферментации для уменьшения количества отходов и получения побочных продуктов.

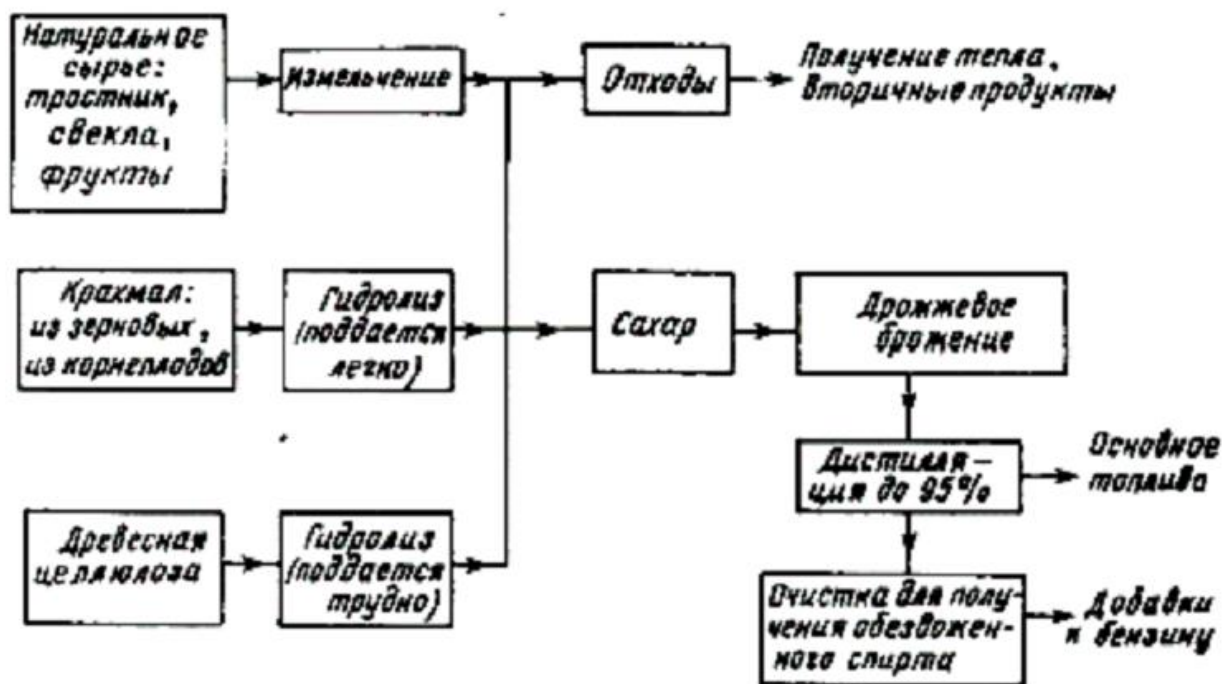


Рисунок 6.9. Блок-схема производства топливного этанола

**Основная реакция превращения сахарозы в этанол имеет вид:**



На практике **выход ограничивается конкурирующими реакциями и потреблением сахарозы на увеличение массы дрожжей**. Промышленный выход составляет около 80%, определяемого данной реакцией.

Реакции ферментации для других сахаров (например, глюкозы  $C_6H_{12}O_6$ ) очень похожи.



*Рисунок 6.10. Установка для производства топливного этанола*

**Ценность конкретного вида биомассы** в качестве сырья для ферментации зависит от его **способности образовывать сахар**. Поэтому многочисленные виды сырья для производства этанола можно разделить на три типа:

**сахар**, получаемый из сахарного тростника, сахарной свеклы или фруктов, который может быть непосредственно преобразован в этанол;

**углеводороды в виде крахмала** из зерновых культур и корнеплодов, которые требуют дополнительной обработки для получения сахара из крахмала (гидролиз на сахар ли использование ферментов солода, содержащегося, например, в ячмене);

**целлюлоза из древесины**, сельскохозяйственных отходов и т.д., которая должна быть превращена в сахараиды с использованием либо кислот, либо **ферментативного гидролиза**.

**Обезвоженный этанол** – жидкость в интервале температур от  $-117$  до  $+78^{\circ}C$  с температурой воспламенения  $423^{\circ}C$ . Применение его в двигателе внутреннего сгорания требует специального карбюратора. Поэтому и смешивают бензин с обезвоженным этанолом (20% по объему) и используют



эту смесь (**газохол**) в обычных бензиновых двигателях. Газохол в настоящее время – обычное топливо в Бразилии (этанол там получают из сахарного тростника); используют его и в США (этанол из кукурузы). Важная **особенность этанола – способность выдерживать ударные нагрузки без взрыва**. Из-за этого он гораздо предпочтительнее добавок из тетраэтилсвинца, вызывающего серьезные загрязнения атмосферы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какую долю потребляемой энергии обеспечивает биомасса?
2. Какое количество твёрдых бытовых отходов образуется ежегодно в России?
3. Сколько воды содержится в высушенной в течение нескольких лет древесине?
4. Какого размера делают древесные гранулы для сжигания в котлах?
5. Сколько тонн древесины требуется для производства 1 т древесного угля?
6. Каких значений достигает КПД пиролиза в лучших установках?
7. Сколько литров этилового спирта получают методом гидролиза из одной тонны древесного сырья?
8. При какой концентрации этилового спирта погибают дрожжи?
9. Сколько метана и углекислого газа содержится в биогазе?
10. Чему равен КПД превращения энергии органических веществ в биогаз?

## 1.7 Практическое занятие 7. Системы геотермального отопления

### 1.7.1 Открытые схемы геотермального теплоснабжения

Открытые системы теплоснабжения, обеспечивающие только горячее водоснабжение. В соответствии со схемой геотермальная вода по однострунной тепловой сети подается непосредственно на водоразбор. Суточная неравномерность потребления горячей воды компенсируется с помощью бака-аккумулятора.

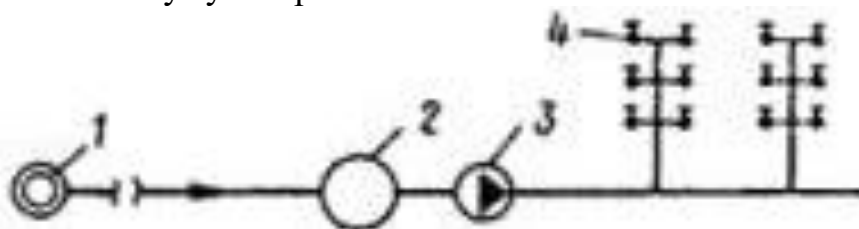


Рисунок 1.7.1 Открытая однострунная геотермальная система горячего водоснабжения: 1 - геотермальная скважина; 2 - бак-аккумулятор; 3 – сетевой насос; 4 - водоразборный кран ГВ.

Недостатком схемы (рисунок 1.7.1) является отсутствие циркуляции теплоносителя в распределительной сети ГВ, в результате чего неизбежно остывание теплоносителя в период отсутствия водоразбора горячей воды (например, ночью). По причине этого недостатка схема может быть рекомендована к применению только при малых расстояниях между термоводозабором и потребителем геотермальной теплоты.

Схема 2 (рисунок 1.7.2) отличается от схемы на рисунке 1.7.1 наличием **двухтрубной распределительной сети**, в которой циркулирует геотермальная вода. Подпитка по мере водопотребления осуществляется из однострунной транзитной тепловой сети. Суточная неравномерность водопотребления уравнивается баком-аккумулятором. Схема может быть рекомендована при сравнительно большом удалении термоводозабора от потребителя геотермальной теплоты.

**Открытые геотермальные системы теплоснабжения с зависимым присоединением отопления** в зависимости от расположения места сброса схема имеет две модификации (рисунок 1.7.3). Геотермальная вода параллельно подается на отопление и горячее водоснабжение. После отопительных систем вода сбрасывается вблизи термоводозабора. Транзитная тепловая сеть имеет двухтрубную прокладку.

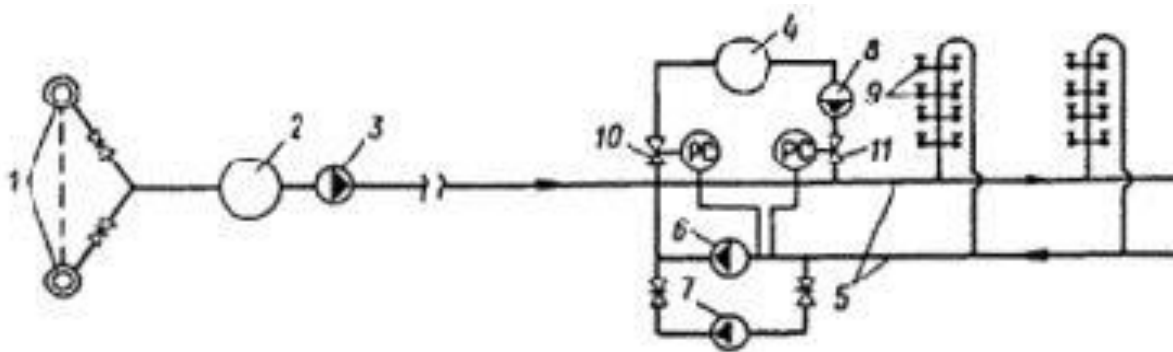


Рисунок 17.2. Открытая однотрубная геотермальная система горячего водоснабжения с двухтрубной распределительной сетью: 1 - геотермальные скважины термоводозабора; 2 - сборный бак-аккумулятор геотермальной воды; 3 - сетевой насос; 4 - бак-аккумулятор распределительной сети; 5 – двухтрубная распределительная сеть, 6, 7, 8 - сетевой циркуляционный и подпиточный насосы распределительной сети; 9 – водоразборный кран; 10 - регулятор слива, 11 - регулятор подпитки.

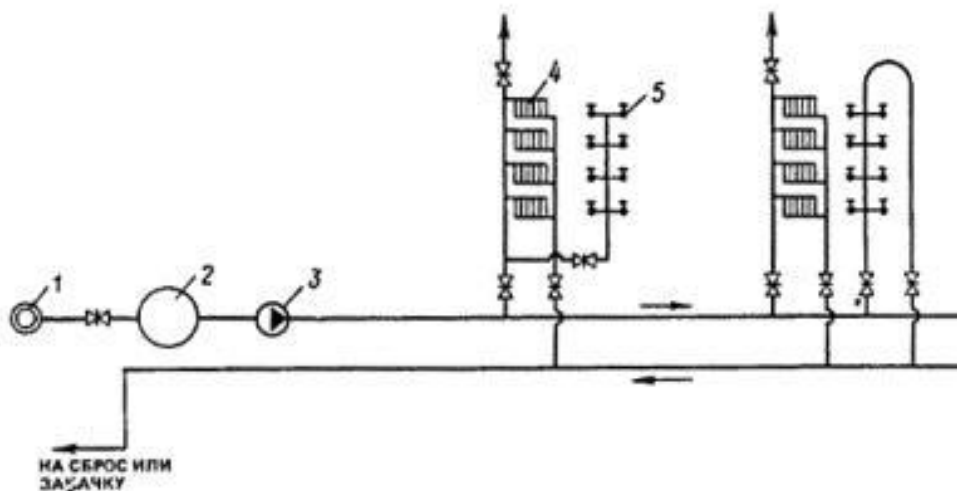


Рисунок 1.7.3. Открытая двухтрубная геотермальная система теплоснабжения: 1 - геотермальная скважина; 2 - бак аккумулятора; 3 – сетевой насос; 4 - отопительные приборы; 5 - водоразборный кран.

## 1.7.2. Закрытые системы геотермального теплоснабжения

### 1.7.2.1 Закрытые геотермальные системы, обеспечивающие только горячее водоснабжение

В зависимости от расположения места сброса и источника питьевой воды могут быть использованы **три вида схемного решения**: (рисунок 7.4). Геотермальная вода подается на теплообменник ЦТПГ, расположенный вблизи термоводозабора, после чего сбрасывается или закачивается в пласт **через скважину обратной закачки**. Вода из источника питьевой воды (например, холодной артезианской скважины) нагревается в теплообменнике,

транспортируется до потребителя и там разбирается на горячее водоснабжение. Суточная неравномерность водопотребления уравнивается с помощью **бака-аккумулятора**. Распределительная сеть выполняется однотрубной.

**Недостатком** здесь также является отсутствие циркуляции теплоносителя в период отсутствия водоразбора.

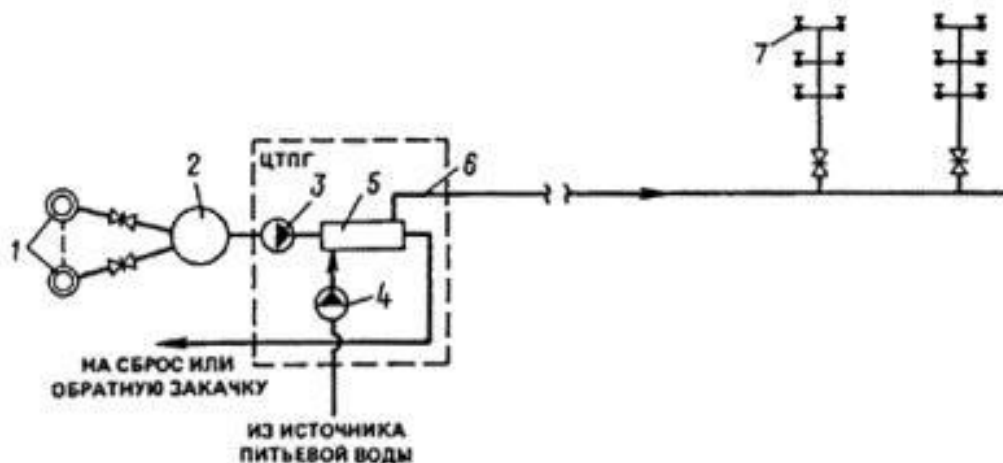


Рисунок 7.4. Однотрубная закрытая геотермальная система горячего водоснабжения с источником питьевой воды, расположенным на термоводозаборе: 1 - геотермальные скважины термоводозабора; 2 - сборный бак-аккумулятор геотермальной воды; 3 - сетевой насос геотермальной воды; 4 - сетевой насос питьевой воды; 5 – сетевой теплообменник; 6 - однотрубная транзитная теплотрасса; 7 - водоразборный кран

Применение схемы (рисунок 7.5) целесообразно при расположении места сброса отработанной геотермальной воды вблизи потребителя геотермальной теплоты. В соответствии со схемой геотермальный теплоноситель по однотрубной транзитной тепловой сети подается в теплообменник ЦТПГ (который расположен вблизи потребителя), после чего сбрасывается. Негеотермальный теплоноситель питьевого качества, циркулируя по двухтрубной распределительной сети, нагревается в теплообменнике ЦТПГ и подается на водоразбор. Подпитка осуществляется из водопровода. Ввиду сравнительно большой протяженности тепловой сети, по которой транспортируется геотермальная вода, схема может быть рекомендована при отсутствии опасности интенсивной коррозии и солеотложения.

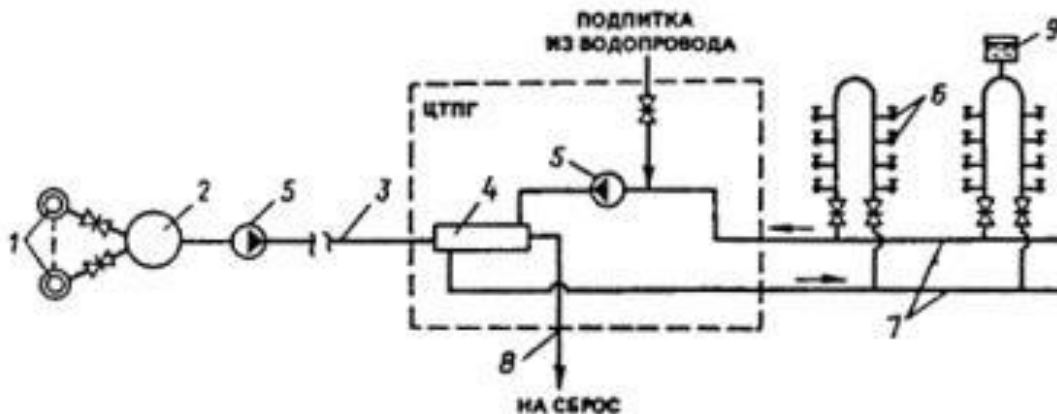


Рисунок 7.5. Однотрубная закрытая геотермальная система горячего водоснабжения: 1 - геотермальные скважины термоводозабора; 2 - сборный бак-аккумулятор геотермальной воды; 3 - однотрубная транзитная теплотрасса; 4 - сетевой теплообменник; 5 - сетевые насосы; 6 - водоразборный кран; 7 - двухтрубная распределительная теплосеть; 8 - сбросная теплосеть; 9 - расширительный бак

### 1.7.2.2. Закрытые геотермальные системы теплоснабжения, обеспечивающие отопление и горячее водоснабжение

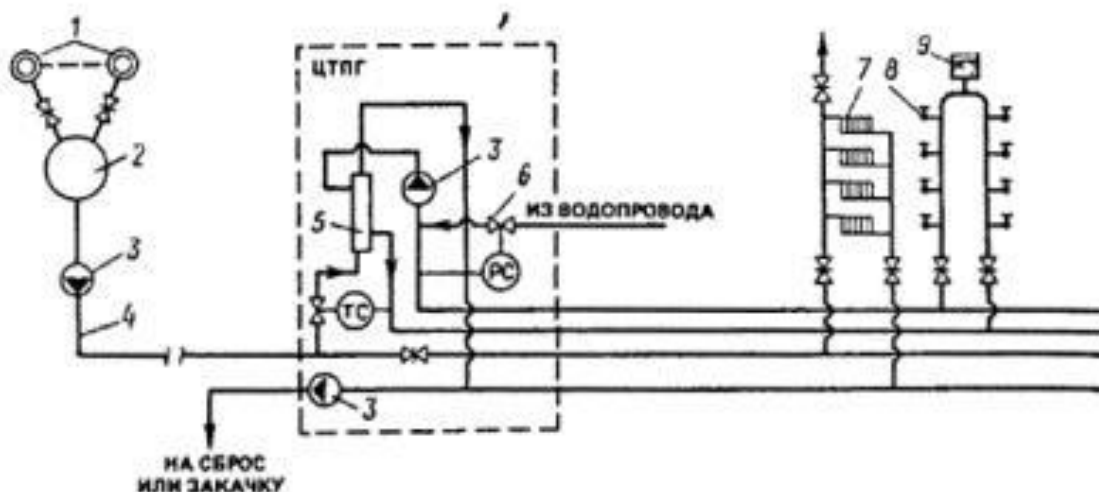


Рисунок 7.6. Закрытая однотрубная геотермальная система теплоснабжения с зависимым присоединением отопления (распределительная сеть четырехтрубная): 1 - геотермальные скважины; 2 - сборный бак-аккумулятор геотермальной воды; 3 - сетевой насос; 4 - однотрубная транзитная теплотрасса; 5 - теплообменник горячего водоснабжения; 6 - регулятор подпитки; 7 - отопительный прибор; 8 - водоразборный кран; 9 - расширительный бак

Расположение места сброса вблизи потребителя, а также отсутствие повышенной коррозионной активности и солеотложения делает возможным создание системы с однотрубной транзитной тепловой сетью для транспортирования геотермальной воды до ЦТПГ, расположенного рядом с потребителем. После

ЦТПГ геотермальная вода сбрасывается. Распределительная сеть после ЦТПГ, в зависимости от качества и температуры геотермального теплоносителя, может быть четырехтрубной с зависимым присоединением отопления (рисунок 7.6) четырехтрубной с независимым присоединением отопления (рисунок 7.7) либо с двухтрубной распределительной сетью и независимым присоединением отопления.

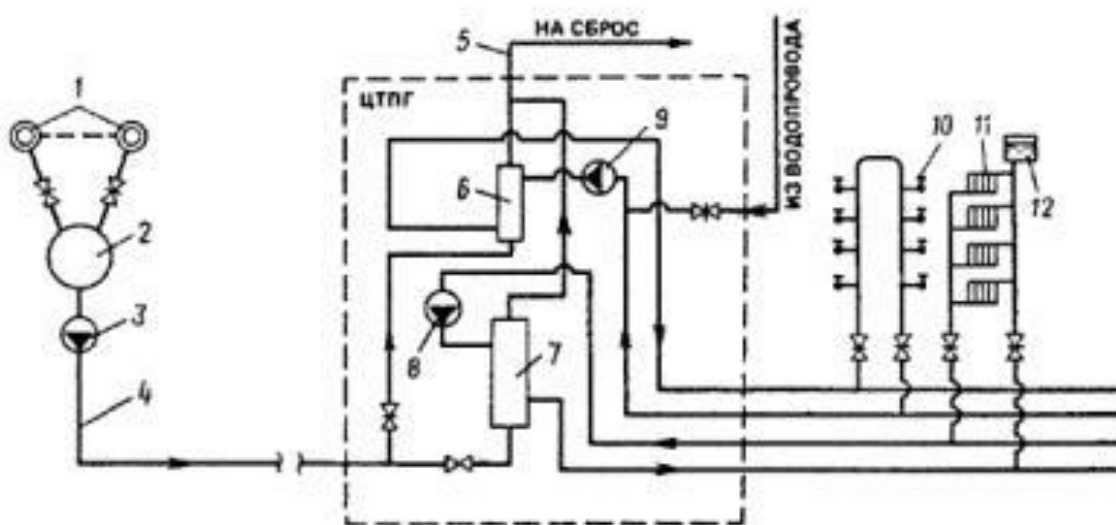


Рисунок 7.7. Закрытая геотермальная система теплоснабжения с независимым присоединением отопления: 1 - геотермальные скважины; 2 - сборный бак-аккумулятор; 3 - сетевой насос геотермальной воды; 4 - транзитная однотрубная теплотрасса; 5 - транзитная сбросная теплотрасса; 6 - водоподогреватель горячего водоснабжения; 7 – отопительный теплообменник; 8 - сетевой насос распределительной сети отопления; 9 - сетевой насос горячего водоснабжения; 10 - водоразборный кран; 11 - отопительный прибор; 12 - расширительный бак

### 1.7.2.3 Закрытые геотермальные системы теплоснабжения, обеспечивающие только отопление

При качестве воды геотермального теплоносителя непригодной для питья и отсутствии воды питьевого качества возможно применение систем теплоснабжения, обеспечивающих только отопление зданий и сооружений (схема рисунок 7.8). Эта схема двухтрубной системы с зависимым присоединением отопления применима при отсутствии угрозы интенсивной коррозии и солеотложения. Система обеспечивает только отопление.

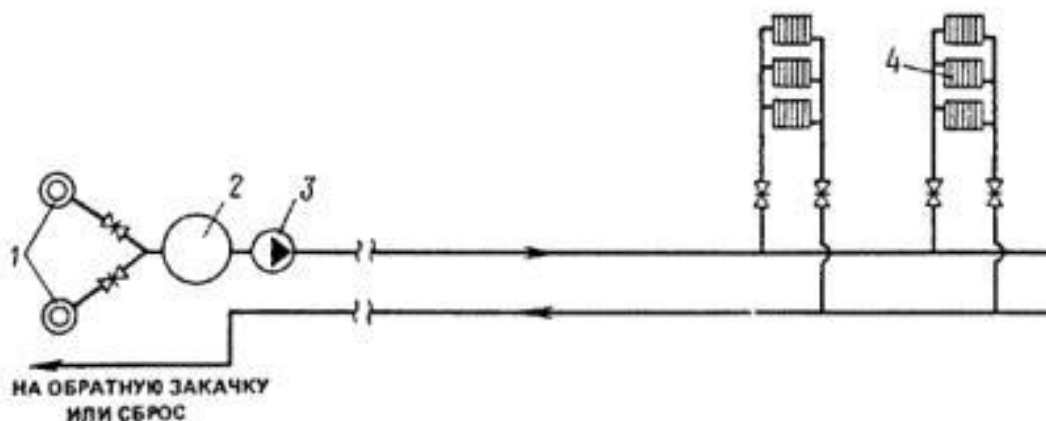


Рисунок 7.8. Геотермальная система теплоснабжения с зависимым присоединением отопления (ГВ отсутствует): 1 - геотермальные скважины; 2 - промежуточный бак-аккумулятор геотермальной воды; 3 - сетевой насос; 4 - отопительные приборы

### 1.7.3 Применение тепловых насосов

В районах с ограниченными ресурсами геотермальных вод, высокой стоимостью их добычи и транспорта рекомендуется система геотермального теплоснабжения с применением компрессионных тепловых насосов. В летний период эта схема может эксплуатироваться в режиме хладоснабжения.

В тепловых насосах в качестве источников теплоты могут использоваться низкотемпературные геотермальные воды ( $t_{\text{нгв}} > 15^{\circ}\text{C}$ ).

Оптимальную в тепловом балансе системы долю расчетной производительности термотрансформаторов при выработке теплоты следует принимать в пределах  $0,1 \div 0,15$ . Нагрев обратной воды предусматривается до  $60^{\circ}\text{C}$ , отопительный коэффициент при двухступенчатом нагреве принимается  $\mu = 4$ .

Соотношение расходов нагреваемой в конденсаторах воды  $G_{\text{конд}}$  и сбрасываемой через испарители  $G_{\text{исп}}$  определяется по формуле:

$$m = G_{\text{конд}} / G_{\text{исп}} = \mu (t'_{\text{o}} - t'_{\text{исп}}) / [(\mu - 1)(t'_{\text{конд}} - t'_{\text{o}})],$$

где  $t'_{\text{конд}}$  и  $t'_{\text{исп}}$  - расчетные температуры воды на выходе из конденсаторов и испарителей,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t'_{\text{исп}}$  - принимается в пределах  $5 \div 10^{\circ}\text{C}$ ;  $t'_{\text{o}}$  - расчетная температура обратной воды систем отопления,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $m = 0,4 \div 0,6$ .

Компрессионные тепловые насосы следует размещать на обратной линии геотермальных систем отопления. Эффективность работы тепловых насосов возрастает при использовании низкотемпературных отопительных

систем, а также за счет **последовательно-противоточного включения нескольких агрегатов.**

Установленную мощность тепловых насосов  $N_{т.н}$ , кВт, и годовой расход электроэнергии  $P^{т.н}_{год}$ , кВт·ч/год, определяют по формулам:

$$N_{т.н} = 1163 \gamma Q'_{отп} \Sigma(1/\mu_i) / k;$$

$$P^{т.н}_{год} = 1163 \gamma Q'_{отп} \tau_{о.п} \varphi_{ср} \Sigma(1/\mu_i) / k,$$

где  $\gamma$  - доля расчетной теплопроизводительности теплового насоса;

$Q'_{отп}$  – отопительная нагрузка, Гкал/ч

$k$  - число ступеней нагрева;

$\mu_i$  - действительный отопительный коэффициент в расчетном режиме;

$\tau_{о.п}$  - продолжительность отопительного сезона, ч;

$\varphi_{ср}$  - среднегодовой коэффициент отпуска теплоты:

$$\varphi_{ср} = 0,64 - 6 \cdot 10^{-4} \cdot \tau_{о.п};$$

1163-коэффициент, вводимый при подстановке  $Q'_{отп}$ , Гкал/ч; при подстановке  $Q'_{отп}$ , кВт, этот коэффициент равен 1.

## Пример

### Исходные данные:

Скорость изменения температуры грунта по глубине  $dT/dz = 60^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ;

Толщина (высота) водоносного пласта  $h = 0,6\text{км}$ ;

Глубина залегания водоносного пласта  $z = 3\text{км}$ ;

Плотность грунта в водоносном пласте  $\rho_{гр} = 2700\text{кг}/\text{м}^3$ ;

Водонасыщенность водоносного пласта  $\alpha = 5\%$ ;

Теплоёмкость грунта  $C_{гр} = 0,84\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

Температура грунта на поверхности Земли  $t_{пз} = 10^{\circ}\text{C}$ ;

Теплоёмкость воды  $C_{в} = 4,2\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

Плотность воды  $\rho_{в} = 1000\text{кг}/\text{м}^3$ ;

Площадь водоносного пласта  $F = 1\text{км}^2$ ;

Температура воды в пласте в конце его эксплуатации  $t_1 = 40^{\circ}\text{C}$ .

**Определить:** Температуру водоносного пласта перед началом его эксплуатации и количество пригодной для эксплуатации геотермальной энергии водоносного пласта.

### Решение.

Задача посвящена использованию геотермальной энергии, сосредоточенной в естественных водоносных горизонтах. Температура



водоносного пласта перед началом его эксплуатации определяется по формуле:

$$t_{пл} = t_{пз} + (dT/dz) \cdot z = 10^{\circ}\text{C} + 60^{\circ}\text{C}/\text{км} \cdot 3\text{км} = 70^{\circ}\text{C}.$$

Теплоёмкость водоносного пласта определяется из выражения:

$$\begin{aligned} C_{пл} &= [\alpha \cdot 10^{-2} \cdot \rho_v \cdot C_v + (1 - \alpha \cdot 10^{-2}) \cdot \rho_{гр} \cdot C_{гр}] \cdot h \cdot F = \\ &= [5 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 \text{кг}/\text{м}^3 \cdot 4,2 \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) + \\ &+ (1 - 5 \cdot 10^{-2}) \cdot 2700 \text{кг}/\text{м}^3 \cdot 0,84 \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})] \cdot 600 \text{м} \cdot 10^6 \text{м}^2 = \\ &= 1,42 \cdot 10^{12} \text{кДж}/\text{К} = 1,42 \cdot 10^9 \text{МДж}/\text{К}. \end{aligned}$$

Количество пригодной для эксплуатации геотермальной энергии водоносного пласта определяется по формуле:

$$E_o = C_{пл} \cdot (t_{пл} - t_1) = 1,42 \cdot 10^9 \text{МДж}/\text{К} \cdot (70 - 40) \text{К} = 4,26 \cdot 10^{10} \text{МДж}.$$

**Ответ.** Температура водоносного пласта равна  $70^{\circ}\text{C}$ , количество пригодной для эксплуатации геотермальной энергии -  $4,26 \cdot 10^{10}$  МДж.

### Контрольные вопросы

1. Источники геотермальной энергии.
2. Как работает геотермальная электростанция с конденсационной турбиной?
3. Как работает геотермальная электростанция с бинарным циклом?
4. Как работает система геотермального теплоснабжения с теплообменниками?
5. Какие естественные и искусственные источники низкопотенциального тепла могут быть использованы для отопления и горячего водоснабжения?
6. Почему для тепловых насосов подбирают рабочие тела, изменяющие агрегатное состояние при необходимых температурах и давлениях?
7. Сколько потребляет энергии компрессор теплового насоса по сравнению с энергией, которую он подаёт в систему отопления?
8. Какие рабочие тела (хладагенты) наиболее распространены в тепловых насосах?
9. Какая температура грунта постоянно держится на глубине более 15 метров?
10. Каким образом тепловой насос может снабжать холодом систему кондиционирования?
11. Какие способы применяют для прокладки труб в земле, если она служит источником тепла для тепловых насосов?

12. Как осуществляется прокладка труб при использовании тепловых насосов с горизонтальным коллектором?
13. Опишите схему отопления при использовании тепловыми насосами тепла водоёмов.

## 1.8 ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Водород нельзя называть источником энергии, потому что в природе он встречается в связанном виде, входит в состав воды, природных углеводородов, биомассы и различных органических отходов, и для его получения требуются затраты энергии. Поэтому водород следует рассматривать как искусственный промежуточный энергоноситель, и, следовательно, для его широкого использования в энергетике должны быть решены проблемы эффективного производства водорода, методов его хранения и транспортировки и его высокоэкономичного использования в электрохимических процессах и термодинамических циклах для конечного получения электрической, механической энергии и тепла (рисунок 8.1).



Рисунок 8.1. Водород: источники первичной энергии, преобразователи энергии и приложения.

Как видно из рисунка 8.1 использование водорода в качестве основного источника энергии на основе топливных элементов в будущем намечается в промышленности, на транспорте, в жилищно-коммунальном хозяйстве и других сферах экономики.

Водород производится четырьмя способами: электролизом, химическими реакциями, термическим разложением воды, фотосинтезом.

Электролитический процесс – самый распространённый, так как прямое извлечение водорода из воды максимально эффективно.

Большие перспективы открывает идея использования установок на возобновляемых источниках энергии (солнечная энергия, энергия ветра) для получения из морской воды водорода, запасы которого в океане практически неисчерпаемы. Полученный водород может накапливаться в огромных подводных резервуарах, а затем транспортироваться по трубам к местам потребления. Водород решит проблему получения самого эффективного и «чистого» топлива для стационарных и транспортных энергетических установок, для теплоснабжения городов и решения других задач.

**При сжигании водород** не отравляет атмосферу и снова превращается в воду. Окислы азота, образующиеся при горении, легко нейтрализуются катализаторами (достаточно объёмными). Энтальпия образования водорода  $H = -242 \text{ Дж/моль}$ , то есть при образовании 1 моля  $H_2O$  (18г) выделяется 242 Дж тепловой энергии (134,444кДж/кг).

В течение многих лет водород, в смеси с  $CO$ , получаемый из угля, использовался для получения тепловой энергии. В настоящее время водород, в основном, применяется в технологических процессах производства бензина и для производства аммиака.

**Наиболее отработанный способ получения чистого водорода – электролиз**, однако эффективность этого процесса составляет примерно 60%. Часть потерь связана с возникновением пузырьков газов вблизи электродов, препятствующих перемещению ионов в электролите и увеличивающих общее сопротивление электрической цепи. Исследования в области изучения механизмов удаления пузырьков и создания пористых материалов с развитой поверхностью уже позволили достигнуть эффективности примерно 80%. Новые электроды допускают более высокие плотности тока, что позволяет уменьшить размеры ячеек и снизить стоимость вырабатываемого газа. **За счёт применения катализаторов ожидается дальнейшее повышение эффективности электролиза.**

**Разлагать воду можно и за счёт высокотемпературного нагрева.** Изменение свободной энергии Гиббса, связанное с обращением электрохимической реакции при абсолютной температуре  $T$ :

$$\Delta G = - nF\xi = \Delta H - T\Delta S, \quad (8.1)$$

где  $\xi$  – электрический потенциал;

$\Delta S$  – изменение энтропии;

$n$  – количество молей вещества, вступивших в реакцию;

$F = 96500 \text{ Кл/моль}$  – постоянная Фарадея.

Реакция разложения:



Она имеет положительные  $\Delta G$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta S$ . В этом случае равенство (8.1) показывает, что с увеличением  $T$  электрический потенциал  $\xi$ , необходимый для разложения воды, уменьшается.

**Водород из биомассы** получается термохимическим или биохимическим способом. При термохимическом методе биомассу нагревают без доступа кислорода до температуры  $500 \dots 800^\circ\text{C}$  (для отходов древесины), что намного ниже температуры процесса газификации угля. В результате процесса выделяется  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ . В биохимическом процессе водород вырабатывают различные бактерии, например, *Rhodobacter sphaeroides*.

Многообещающей является замена электроэнергии, необходимой для разложения воды, теплом от дешёвого источника, в качестве которого можно использовать, например, солнечное излучение: получение тепла при  $T \approx 1000\text{K}$  с помощью солнечных концентраторов может существенно снизить стоимость получения водорода. Так в Японии в Иокогамском университете была создана установка по производству водорода из морской воды, представляющая собой батареи термоэлементов, поглощающих солнечные лучи. Солнечная энергия при помощи специальных линз концентрируется на концах термоэлементов, а противоположные концы охлаждаются морской водой. Возникающий в термоэлементах, вследствие разности температур, электрический ток разлагает воду на кислород и водород. Блок термоэлементов площадью 10 квадратных метров может обеспечить получение 10000 кубических метров водорода в год. При больших мощностях установок попутно будет решаться и другая, не менее важная, проблема современности - **пополнение земной атмосферы кислородом**, что особенно важно для крупных городов и промышленных центров.

Электролитом при получении водорода может быть сама морская вода. Однако при этом возникают некоторые технические трудности, связанные с выделением хлора на «кислородном» электроде. Приблизённые химические расчёты показывают, что можно получать чистый водород, если поддерживать напряжение на электролизной ячейке ниже 1,8В. Это, к сожалению, ограничивает плотность тока, что приводит к необходимости увеличивать площадь поверхности электродов.

**На пути использования водорода стоит немало технических преград.** Возникает проблема хранения водорода. Небольшие размеры молекулы позволяют водороду диффундировать через непроницаемые стенки сосудов. Его можно помещать в химически обработанные емкости в газообразном или жидком состоянии. Хранение водорода даже под высоким давлением требует значительных объёмов. Водород может быть сжижен, точка его кипения составляет  $20^\circ\text{K}$ .

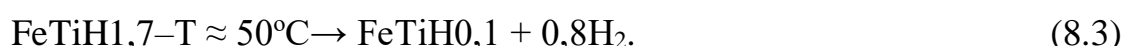
Сравнение традиционной передачи электроэнергии по ЛЭП и водорода по топливным трубопроводам показывает, что при транспортировке энергии на расстояние более 200км дешевле оказывается транспорт водорода. В США действует 750 километров, а в Европе - 1500 километров водородных

трубопроводных систем. Трубопроводы действуют при давлении 1...2МПа, изготовлены из стальных труб диаметром 25...30см.

Старейший водородный трубопровод действует в районе германского Рура. 210 километров трубопровода соединяют 18 производителей и потребителей водорода. Трубопровод действует более 50 лет без аварий.

Самый длинный трубопровод длиной 400 километров проложен между Францией и Бельгией. После небольших изменений водород может передаваться по существующим газопроводам природного газа.

**Химическое аккумулирование в виде металлгидридов**, из которых водород может быть извлечён при нагревании, удобно в эксплуатации и позволяет хранить большие запасы водорода, например:



Эта реакция обратима, так что портативный гидридный аккумулятор может подзаряжаться централизованно на заправочных станциях. Тепло, выделяющееся при зарядке, может использоваться в тепловых сетях местного значения, а сами **гидридные аккумуляторы** – в качестве «топливных баков» транспортных средств.

Водород можно сжигать для производства тепла или выработки электроэнергии, или непосредственно для осуществления движения.

Однако **топливные элементы** способны заменить собой двигатели внутреннего сгорания и другие двигатели, где энергия получается счёт сжигания различных топлив, так как предлагают более эффективное использование водорода.

**Топливные элементы** относятся к химическим источникам тока. Они осуществляют **прямое превращение химической энергии топлива в электрическую**, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения. Так как преобразование тепло - работа здесь отсутствует, **эффективность топливных элементов не подпадает под ограничения второго закона термодинамики**, как это происходит в обычных системах топливо – тепло – работа – электроэнергия.

**Теоретически КПД преобразования химической энергии в электрическую может достигать 100%**. Важно отметить, что КПД топливного элемента не зависит от того, работает топливный элемент на полную мощность или нет (в отличие от ДВС, газовых турбин и т. д.).

**Основное отличие топливных элементов от аккумуляторов** электрической энергии в том, что аккумуляторы необходимо заряжать электроэнергией, которую они потом преобразуют в химическую и обратно, в то время как **топливные элементы сами производят «направленное движение электронов»**. То есть они не хранят энергию, как аккумуляторы, а

путём преобразования части топлива, которое поступает извне, на выходе выдают электрический ток.

Конструктивно топливный элемент состоит из двух электродов: **анода** и **катода**, активированных, как правило, палладием (или другими металлами платиновой группы) – и разделяющего их электролита. Водород подводится к аноду, а кислород (или воздух) – к катоду (рисунок 8.2).

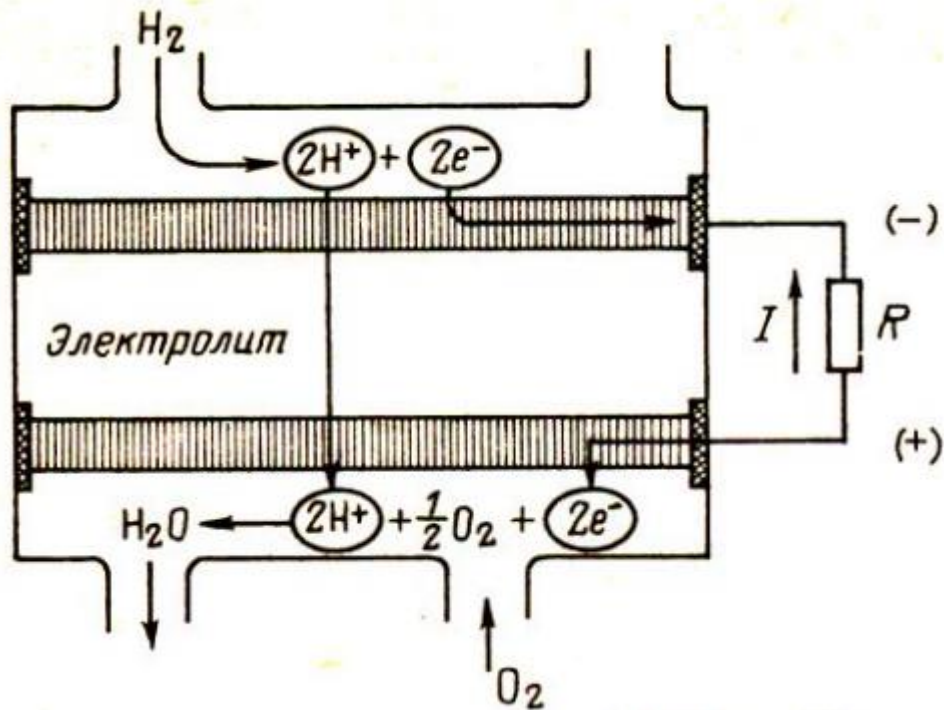


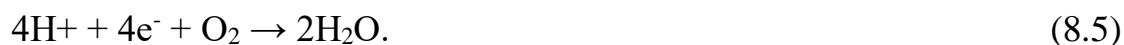
Рисунок 8.2. Принципиальная схема топливного элемента

В результате катализа на пористом аноде молекулы водорода разлагаются на водородные ионы  $H^+$  (протоны) и электроны  $e^-$  (протекает реакция диссоциации):



Работа топливного элемента основана на том, что электролит пропускает через себя протоны (по направлению к катоду), а электроны – нет. Они движутся к катоду по внешнему проводящему контуру. Это движение электронов и есть электрический ток, который может быть использован для приведения в действие внешнего устройства, подсоединённого к топливному элементу, то есть «нагрузки».

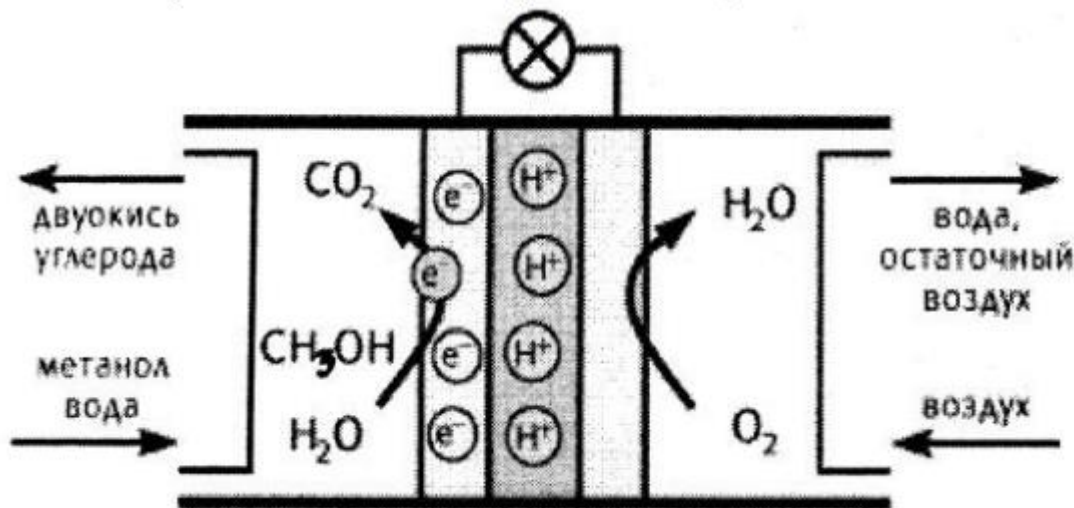
Со стороны катода топливного элемента протоны и электроны вступают в реакцию с подаваемым на катод кислородом с образованием воды:



В своей работе топливные элементы используют водород и кислород.

Водород может подаваться непосредственно или путём выделения его из внешнего источника топлива, такого как природный газ, бензин и метанол. В случае внешнего источника его необходимо химически преобразовать, чтобы извлечь водород.

**Процесс получения водорода из различного сырья называют «реформингом».** В настоящее время в большинстве топливных элементов, которые «работают» в сфере транспорта, используется метанол (рисунок 8.3).



*Рисунок 8.3. Принципиальная схема топливного элемента, работающего на метаноле*

**Процесс, происходящий в водородно-кислородном топливном элементе,** по своей природе является обратным хорошо известному процессу электролиза, в котором происходит диссоциация воды при прохождении через электролит электрического тока. Действительно, в некоторых типах топливных элементов процесс может быть обращен: приложив к электродам напряжение, можно разложить воду на водород и кислород, которые могут быть собраны на электродах. Если прекратить зарядку элемента и подключить к нему нагрузку, такой регенеративный топливный элемент сразу начнет работать в своем нормальном режиме.

Продуктами работы топливного элемента, в соответствии с вышесказанным, являются тепло и вода, причем и то и другое можно также утилизировать и поднять тем самым коэффициент полезного действия системы до 90...95%. Таким КПД не обладает ни одна из имеющихся на данный момент энергетических систем.

Напряжение, возникающее на отдельном топливном элементе, не превышает 1,1 вольта. Для получения необходимой величины напряжения топливные элементы соединяются последовательно в батареи, а для получения необходимой мощности батареи топливных элементов соединяются параллельно. Такие батареи топливных элементов вместе с элементами газораспределения и терморегулирования монтируются в единый конструктивный блок, называемый **электрохимическим генератором.**



Интересно то, что по своему устройству и принципу действия **топливные элементы аналогичны биологической клетке**. В каждой клетке есть свой собственный водородно-кислородный энергетический элемент. В роли источника водорода в теле человека и животных выступает пища, содержащая жиры, белки и углеводы. Кислород поступает через лёгкие в кровь и далее подводится к клеткам. Соединение водорода с кислородом в организме являет собой основу биологического существования: химическая энергия преобразуется в тепловую, механическую, электрическую и световую.

**В зависимости от химических и физических особенностей применяемого электролита топливные элементы подразделяются на несколько различных типов:**

### **1. Щелочные топливные элементы (Alkaline, Fuel, Cells, AFC).**

В качестве электролита используется концентрированный **гидроксид калия (KOH) либо его водный раствор**, а основным материалом для изготовления электродов является никель. Эти топливные элементы использовались с середины 1960-х годов в космических программах, обеспечивая питанием электрические системы космических кораблей «Буран», «Шаттл» и др. Коммерческое применение их ограничено, так как они должны работать с чистым водородом и кислородом (либо с кислородом воздуха, из которого удалён углекислый газ). **Щелочные топливные элементы имеют КПД до 70%**. Реакция окисления водорода протекает через электроокисление водорода на аноде:



Электровосстановление кислорода на катоде:



Гидроксид-ионы двигаются в электролите от катода к аноду, а электроны – по внешней цепи от анода к катоду.

Щелочные элементы работают при температуре около 80°C.

**Основной недостаток щелочных элементов** заключается в необходимости **использования чистых кислорода и водорода**, поскольку содержание в

топливе или окислителе примесей углекислого газа (CO<sub>2</sub>) приводит к карбонизации щелочи.

### **2. Топливные элементы с ионообменной мембраной (PEM).**

Технология изготовления элементов данного типа была разработана в 50-х годах XX века инженерами компании General Electric. Подобные

топливные элементы использовались для получения электроэнергии на американском космическом корабле Gemini. Отличительной особенностью PEM-элементов является применение **графитовых электродов и твердополимерного электролита** (или, как его еще называют, ионообменной мембраны - Proton Exchange Membrane). В качестве топлива в PEM-элементах используется чистый водород, а роль окислителя выполняет содержащийся в воздухе кислород. Водород подается со стороны анода, где происходит **электрохимическая реакция**:



Ионы водорода перемещаются от анода к катоду через электролит (ионный проводник), в то время как электроны – через внешнюю цепь.

На катоде, со стороны которого подаётся окислитель (кислород или воздух), происходит реакция окисления водорода с образованием чистой воды:



Рабочая температура PEM-элементов составляет около 80°C. При таких условиях электрохимические реакции протекают слишком медленно, поэтому в конструкции топливных элементов данного типа используется катализатор – обычно тонкий слой платины на каждом из электродов. **Одна ячейка такого элемента, состоящая из пары электродов и ионообменной мембраны, способна генерировать напряжение порядка 0,7В.** Для увеличения выходного напряжения массив отдельных ячеек соединяется в батарею.

PEM-элементы обеспечивают высокую плотность тока, что позволяет уменьшать их вес, стоимость, объём и улучшать качество работы.

Неподвижный твёрдый электролит упрощает герметизацию в процессе производства, уменьшает коррозию и обеспечивает более долгий срок службы топливных элементов.

PEM-элементы способны работать при относительно низкой температуре окружающей среды и обладают довольно высокой эффективностью (КПД составляет от 40 до 50%). В настоящее время на базе PEM-элементов созданы действующие прототипы энергоустановок мощностью до 50кВт; в стадии разработки находятся устройства мощностью до 250кВт.

**Существует несколько ограничений, препятствующих более широкому распространению данной технологии.** Это относительно высокая стоимость материалов для изготовления мембран и катализатора. Кроме того, в качестве топлива можно использовать только чистый водород.

### 3. Топливные элементы на фосфорной кислоте (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC).

В качестве электролита в фосфорнокислых элементах используется жидкая фосфорная кислота, обычно заключенная в порах матрицы из карбида кремния. Для изготовления электродов применяется графит. Происходящие в фосфорнокислых элементах реакции электроокисления водорода аналогичны тем, которые протекают в PEM-элементах.

Рабочая температура фосфорнокислых элементов несколько выше по сравнению с PEM - и щелочными и колеблется в пределах от 150 до 200°C. Тем не менее для обеспечения необходимой скорости электрохимических реакций **необходимо использовать катализаторы** (платину либо сплавы на ее основе). Благодаря более высокой рабочей температуре фосфорнокислые элементы менее чувствительны к химической чистоте топлива (водорода), чем PEM - и щелочные топливные элементы. Это позволяет применять топливную смесь, содержащую 1...2% оксида углерода. В качестве окислителя можно использовать обычный воздух, поскольку содержащиеся в нем вещества не вступают в реакцию с электролитом.

Фосфорнокислые топливные элементы обладают относительно невысоким КПД (порядка 40%) и требуют некоторого времени для выхода на рабочий режим при холодном старте. **Однако PAFC имеют и целый ряд преимуществ**, в том числе более простую конструкцию, а также высокую стабильность и низкую летучесть электролита.

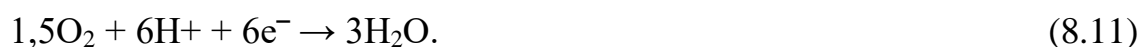
В настоящее время на базе фосфорнокислых топливных элементов создано и запущено в коммерческую эксплуатацию большое количество энергоустановок **мощностью от 200кВт до 20МВт**.

### 4. Топливные элементы с прямым окислением метанола (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC).

Элементы с прямым окислением метанола являются одним из **вариантов реализации элементов с ионообменной мембраной**. Топливом для DMFC-элементов служит водный раствор метилового спирта (метанола). Необходимый для реакции водород (и побочный продукт в виде углекислого газа) получается за счет **прямого электроокисления раствора метанола на аноде**:



На катоде происходит реакция окисления водорода с образованием воды:



Рабочая температуры DMFC-элементов составляет примерно 120°C, что немного выше по сравнению с водородными PEM-элементами.

**Недостатком низкотемпературного преобразования является более высокая потребность в катализаторах.** Это неизбежно приводит увеличению стоимости таких топливных элементов, однако данный недостаток компенсируется удобством использования жидкого топлива и отсутствием необходимости в применении внешнего конвертора для получения чистого водорода.

### **5. Топливные элементы с электролитом из расплава карбоната лития и натрия (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC).**

Данный тип топливных элементов относится к **высокотемпературным устройствам.**

В них применяется электролит, состоящий из карбоната лития ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) либо карбоната натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), находящегося в порах керамической матрицы. В качестве материала для анода используется никель, легированный хромом, а для катода - литированный оксид никеля ( $\text{NiO} + \text{LiO}_2$ ). При нагревании до температуры порядка  $650^\circ\text{C}$  компоненты электролита расплавляются, в результате чего образуются ионы углекислой соли, движущиеся от катода к аноду, где они вступают в реакцию с водородом:



Высвободившиеся электроны движутся по внешней цепи обратно к катоду, где происходит реакция:



Высокая рабочая температура данных элементов позволяет применять в качестве топлива природный газ (метан), преобразуемый встроенным конвертором в водород и монооксид углерода:



**MCFC-элементы обладают высоким КПД (до 60%)** и позволяют использовать в качестве катализатора не платину, а более дешевый и доступный никель. Им требуется существенное количество времени для того, чтобы они достигли рабочей температуры и смогли реагировать на изменения в потребности в электричестве, и поэтому лучше всего **они подходят для условий, где необходима постоянная подача больших количеств электроэнергии.** Вследствие большого количества выделяемого при работе тепла данный вид топливных элементов хорошо **подходит для создания стационарных источников электрической и тепловой энергии,** однако малопригоден для эксплуатации в мобильных условиях. В настоящее время на базе MCFC-элементов уже созданы стационарные энергоустановки

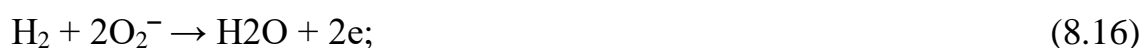
мощностью до 2МВт. Наибольшее количество подобных установок построено в США и Японии.

## 6. Топливные элементы с твёрдым электролитом (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC).

Данный тип элементов имеет еще более высокую рабочую температуру (от 800 до 1000°C), чем MCFC. В SOFC применяется керамический электролит на основе оксида циркония ( $ZrO_2$ ), стабилизированного оксидом иттрия ( $Y_2O_3$ ). На катоде происходит электрохимическая реакция с образованием отрицательно заряженных ионов кислорода:



Отрицательно заряженные ионы кислорода движутся в электролите по направлению от катода к аноду, где происходит окисление топлива (обычно смеси водорода с монооксидом углерода с образованием воды и углекислого газа:



SOFC -элементы обладают высоким КПД (до 60%) Их относительно простая конструкция (рисунок 8.4), обусловленная использованием твёрдого электролита, в сочетании с существенным количеством времени, необходимым для того, чтобы они достигли рабочей температуры и смогли реагировать на изменения в потребности в электричестве, делает их подходящими для больших и очень больших стационарных электрогенераторных установок и электростанций.

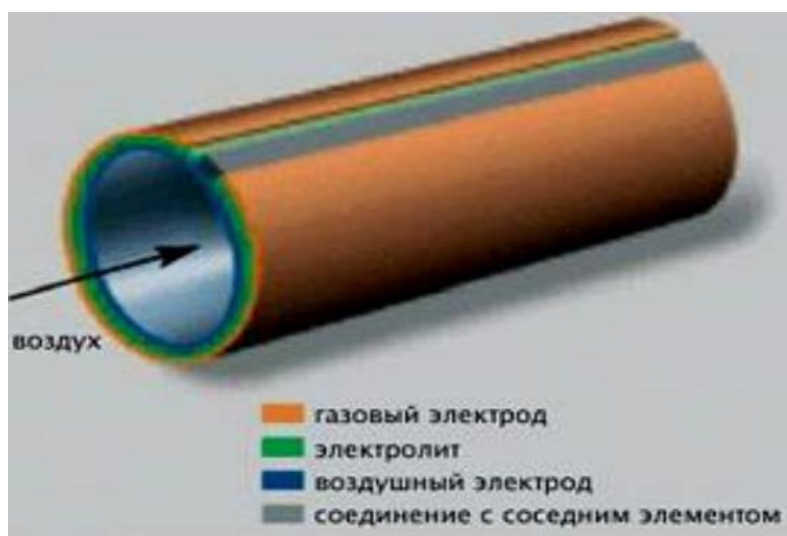


Рисунок 8.4. Принципиальная схема топливного элемента «Siemens» (технология SOFC)

Элементы типа SOFC обладают теми же достоинствами, что и MCFC, включая возможность использования в качестве топлива природного газа. Компоненты SOFC обладают более высокой химической стабильностью, однако себестоимость их производства несколько выше по сравнению с MCFC.

На рисунке 8.5 схематично приведены электрохимические реакции в различных типах топливных элементов.

В последнее время среди новых лидировали установки с топливными элементами на расплаве карбоната (MCFC). На втором месте по числу новых были установки с топливными элементами на фосфорной кислоте (PAFC).

**Протонообменные технологии (PEM) применялись**, в основном, в установках мощностью до 10кВт и в автомобильных приложениях.

**Технологии топливных элементов, предлагаемые топлива и приложения** приведены на рисунке 8.6. Топливные элементы могут использоваться в целом ряде устройств, начиная от весьма малогабаритных топливных элементов в портативных устройствах, как мобильные телефоны и ноутбуки, в средствах передвижения, включая автомобили, грузовики, автобусы и суда, вплоть до тепло- и электрогенераторов, используемых в стационарных условиях, как в промышленности, так и в жилищах.

**Хотя большая часть стационарных топливных элементов в настоящее время работает на природном газе**, всё большее количество установок работают с альтернативными видами топлив. Усилилось применение биогаза. В 2005 году биогаз вышел на второе место после природного газа. В 2005 году были построены электростанции (Япония, Германия), работающие на биогазе, получаемом из древесных отходов, пластика, муниципальных сточных вод.

**Водород считается наиболее подходящим топливом для использования топливных элементов на автомобилях**, легких грузовиках и автобусах с электрическим приводом (рисунок 8.7). Водород можно запасти на борту в сжатом или жидком состоянии или в форме гидридов металлов и химических гидридов. Транспортные средства на топливных элементах потребляют мало топлива, сохраняя управляемость и комфорт.

Снижение выбросов улучшит состояние локальной атмосферы и окружающей среды.

Начиная с 2003 года на дорогах появилось несколько «гибридных автомобилей на топливных элементах» разных производителей. Одни из наиболее разрекламированных проектов - это «GM-Hydrogen III» (на базе Opel Zafira), «Ford Focus FCV» (Fuel Cell Vehicle) и «Toyota FCHV-4». **На автомобилях с топливными элементами применяется в основном топливный элемент PEM (Proton Exchange Membrane) с ионообменной мембраной**, КПД которых достигает 60%, а мощность – 250кВт. Рабочая температура этих топливных элементов укладывается в пределы 0...80°C.

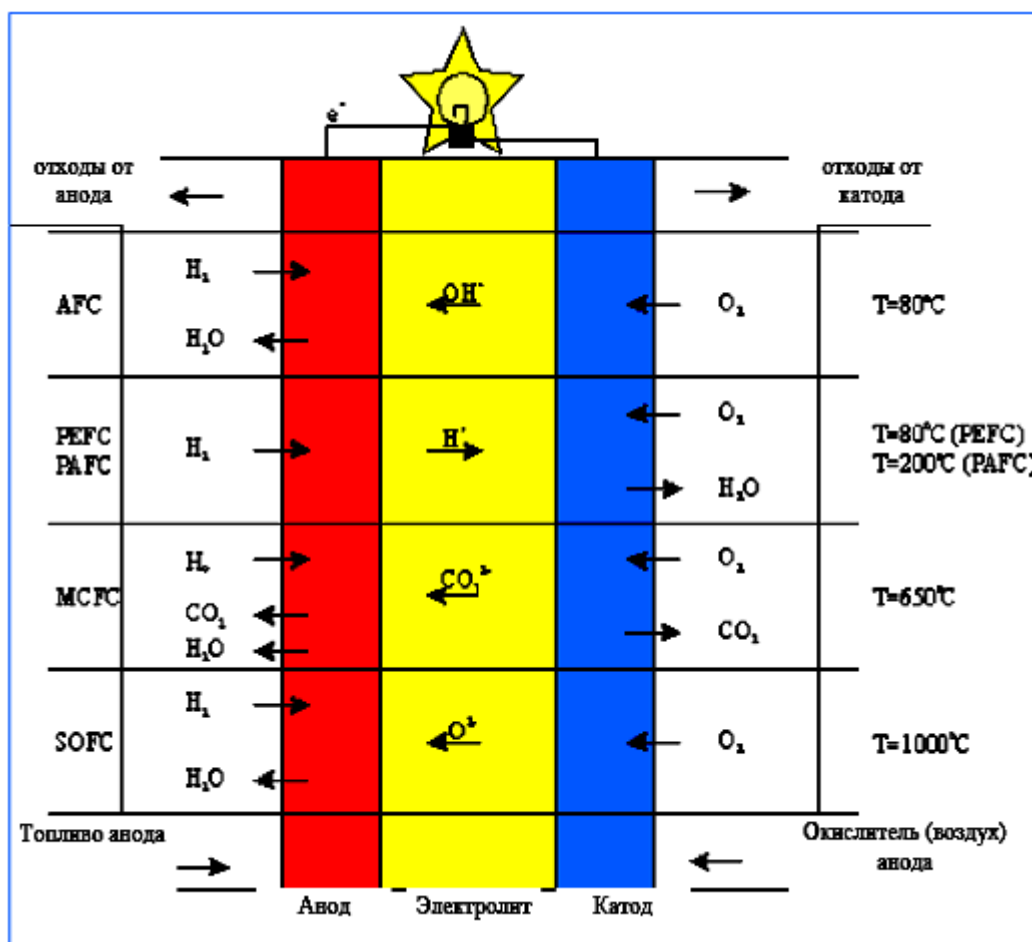


Рисунок 8.5. Электрохимические реакции в различных типах топливных элементов



Рисунок 8.6. Технологии топливных элементов, предлагаемые топлива и приложения

Топливные элементы могут также быть бортовыми источниками электроэнергии. Вспомогательные энергоустройства, установленные на обычных автомобилях и грузовиках, снизят выбросы за счет управления кондиционерами, холодильниками или электрооборудованием - особенно на стоянках.

Ведутся разработки и в сфере пассажирского и грузового транспорта. Многие проблемы веса и температуры здесь решаются по-другому, нежели для легковых автомобилей – проще, и уже накоплен большой опыт эксплуатации тяжёлых автомобилей «на водороде».

Топливные элементы таким же образом применимы и на водном транспорте, где также существуют проблемы выбросов и шумов.

Водородные топливные элементы уже используются как бортовые бесшумные источники - без теплового следа - для подводных лодок. Они могут обеспечить бортовое электроснабжение и даже маршевые двигатели для кораблей, особенно в районах с чувствительной окружающей средой, где допускаются только весьма низкие выбросы с плавсредств.

В Германии строятся подводные лодки класса U-212 с топливными элементами производства компании Siemens AG, которая более 30 лет занимается исследованиями в этой области. U-212 состоят на вооружении Германии, поступили заказы из Греции, Италии, Кореи, Израиля.

Под водой лодка работает на водороде и практически не производит шумов.

В США компания Fuel Cell Energy разрабатывает топливные элементы мощностью 625кВт для военных кораблей.

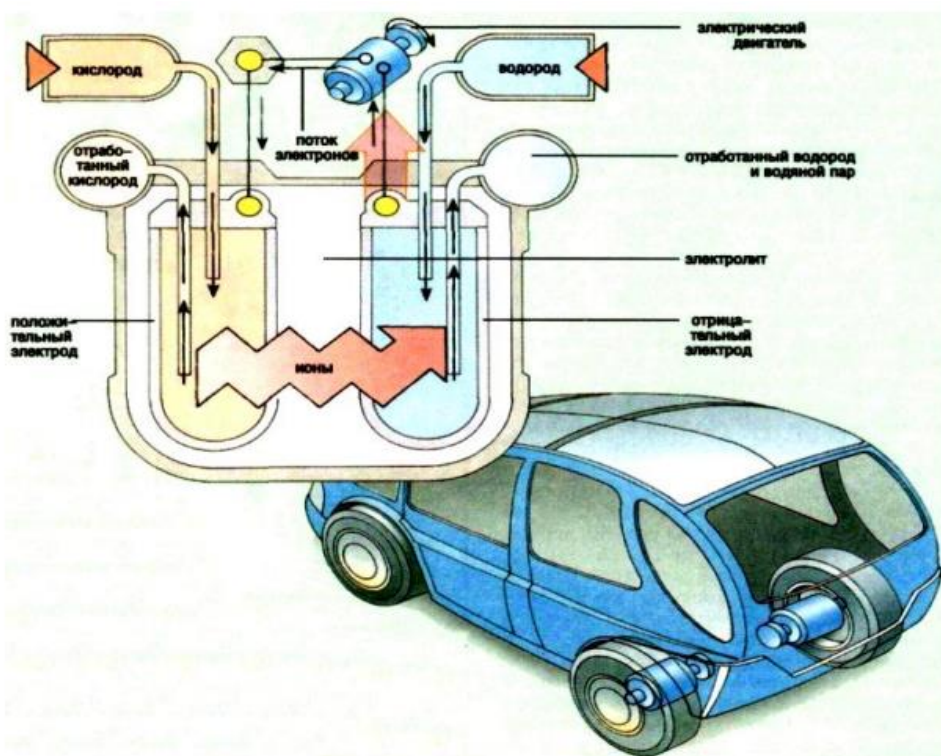


Рисунок 8.7. Применение топливных элементов на автомобиле с электромотором



Японская подводная лодка Urashima с топливными элементами PEM производства Mitsubishi Heavy Industries была испытана в августе 2003 года.

Появляются разнообразные по размерам и типам стационарные топливные элементы (рисунок 8.8), созданные из различных материалов и функционирующие при температурах от 60 до 1000°С.

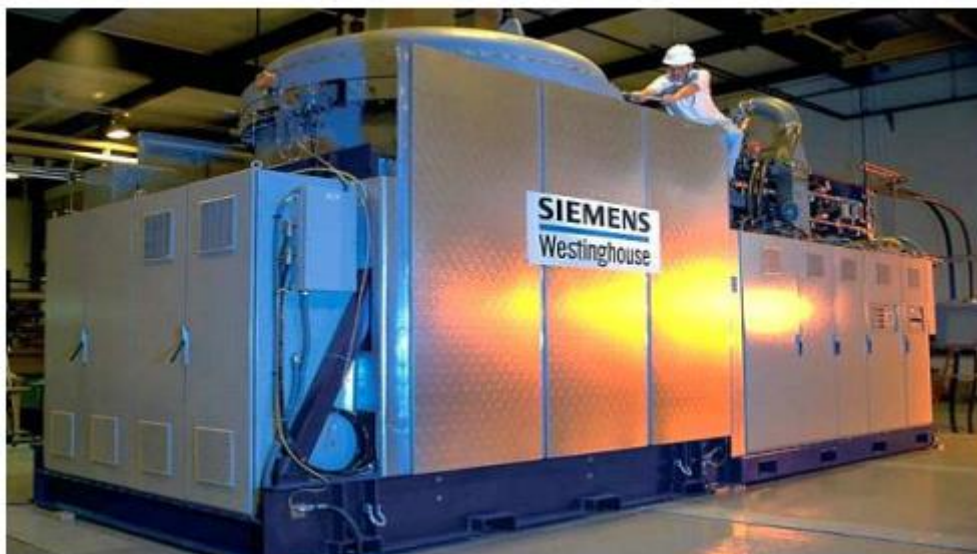


Рисунок 8.8. Стационарная силовая установка на топливных элементах производства компании Siemens (Германия)

Уже не один год электростанции на топливных элементах практически во всех уголках цивилизованного мира обеспечивают электроэнергией не только отдельные строения, но также целые кварталы и микрорайоны ряда городов.

Топливные элементы потенциально пригодны для электроснабжения в течение намного большего срока, чем аккумуляторы в портативном исполнении. Рост портативной электроники и электрического оборудования (мобильные телефоны, радиоприемники, ноутбуки и электроинструменты) могут открыть широкий спектр различных приложений.

**Портативные топливные элементы могут использовать водород, этанол или метанол.**

По сравнению с широко распространёнными в настоящее время источниками автономного электропитания, используемыми в мобильных персональных компьютерах и портативных устройствах, **топливные элементы имеют ряд важных преимуществ.**

В первую очередь стоит отметить **высокий коэффициент полезного действия топливных элементов**, составляющий, в зависимости от типа, от 40 до 60%. Высокий КПД позволяет изготавливать источники питания с более высокой удельной энергоёмкостью, благодаря чему достигается уменьшение их массогабаритных показателей при сохранении мощности и времени автономной работы. Кроме того, более энергоёмкие источники питания позволяют значительно продлить время автономной работы существующих устройств, не увеличивая их размеры и вес.

Другим важным достоинством химических топливных элементов является возможность практически **мгновенного возобновления их энергоресурса** даже при отсутствии внешних источников электропитания - для этого достаточно **установить новую ёмкость (картридж) с используемым топливом**. Применение не расходуемых в процессе реакции электродов позволяет создавать **топливные элементы с очень большим сроком службы**.

Нельзя не отметить и значительно более высокую экологическую чистоту химических топливных элементов по сравнению с гальваническими батареями. Расходным материалом для топливных элементов служат лишь емкости с топливом, а **основным продуктом реакции является обычная вода**. Замена используемых в настоящее время батареек и аккумуляторов на топливные элементы позволит значительно сократить объем подлежащих переработке отходов, содержащих ядовитые и вредные для окружающей среды вещества.

Японская фирма Casio представила прототип ноутбука с питанием от топливных элементов с ионообменной мембраной (рисунок 8.9). Фирма утверждает, что ноутбук с топливным элементом будет в два раза легче своих аналогов на литий-ионных аккумуляторах, а по продолжительности работы будет превосходить их в 4 раза. Новый топливный элемент содержит так называемый **микро-реактор (конвертор метанола)**, образованный на кремниевой «вафле» и осуществляющий химическую реакцию преобразования топлива на основе метанола в водород с участием катализатора. **КПД подобной реакции достигает 98%**.

Перезарядка элемента будет заключаться лишь в заливке очередной порции горючего и не потребует выключения питаемого устройства. В настоящее время емкость топливного элемента вмещает 120мл метанола. Этого достаточно для обеспечения работы ноутбука потребляемой мощностью 15Вт в течение 10 часов.



*Рисунок 8.9. Ноутбук и источник питания (топливные элементы с ионообменной мембраной) фирмы Casio (Япония)*

На данный момент топливные элементы являются **наиболее перспективным источником электрической энергии**. Их преимущества по сравнению с другими источниками энергии заключаются в следующем:

высокий КПД, достигающий 95%;

топливный элемент и продукты его работы экологически чисты;

механическая простота, слабая вибрация и низкий шум;

высокое отношение электроэнергии к выходу тепла по сравнению с обычными тепловыми электростанциями;

топливный элемент практически «всеяден», то есть в качестве топлива может использоваться практически любое водородсодержащее топливо.

Оценить преимущества топливных элементов можно по следующим двум рисункам. На рисунке 8.10 представлены гистограммы КПД различных источников энергии, на рисунке 8.11 – шумовой уровень этих же источников.

**Основной недостаток топливных элементов** – пока ещё высокая их стоимость.

Рост потребностей в топливе и энергии при ресурсных и экологических ограничениях уже становится критическим фактором дальнейшего развития экономики России и делает актуальной своевременную подготовку новой энергетической концепции и технологии, способных удовлетворить существенную часть прироста энергетических потребностей страны, когда потенциал ископаемого органического топлива будет исчерпан.

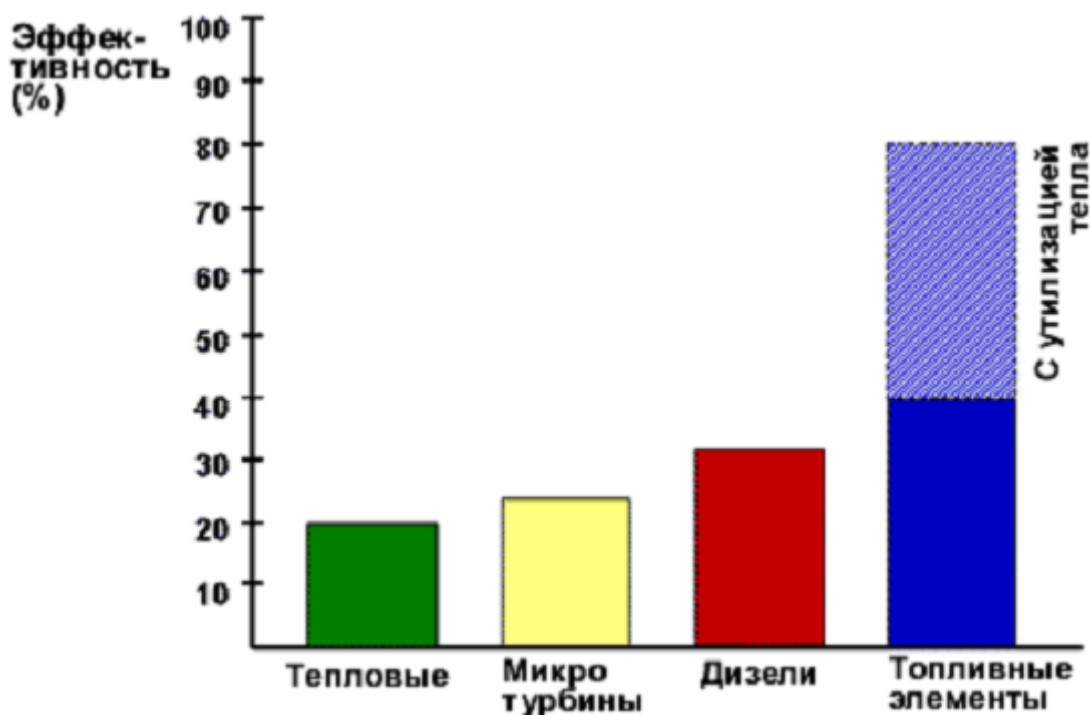
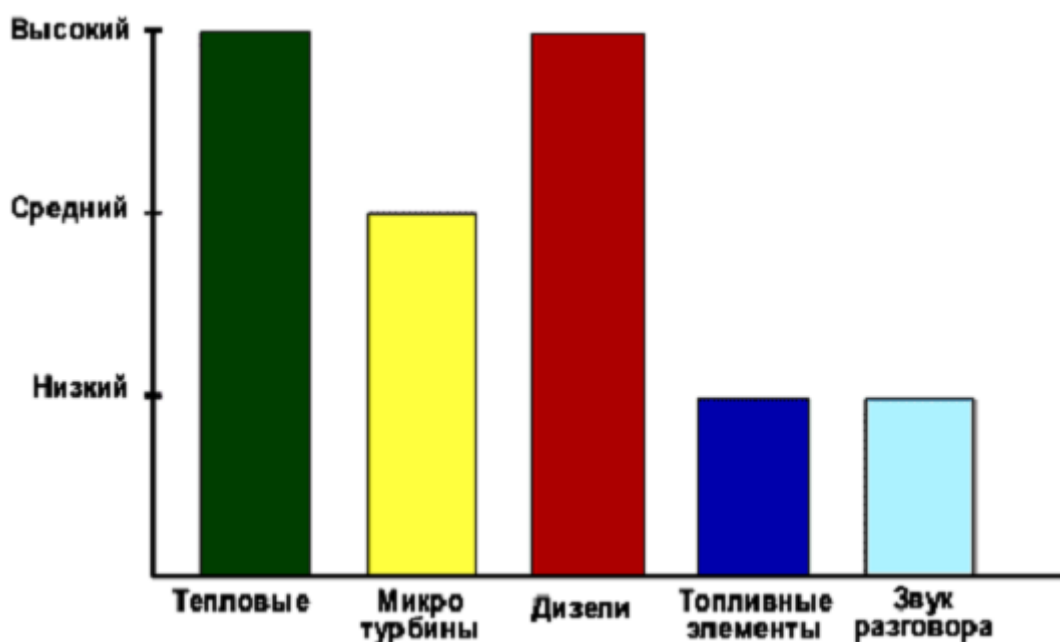


Рисунок 8.10. Гистограмма КПД различных источников энергии



*Рисунок 8.11. Гистограмма уровня шума различных источников энергии*

**Сегодня уже не существует альтернативы опережающему развитию солнечно-водородной энергетики.** Технологии солнечно-водородной энергетики как макротехнологии самого высокого уровня, вобравшие в себя весь спектр локальных технологий: от нанотехнологий и материаловедения до электрокатализа и электрохимии, способны обеспечить ускоренное продвижение экономики России по инновационному пути развития и создание новых базовых технологий в промышленности.

В 2003 году горно-металлургическая компания «Норильский никель» совместно с Российской академией наук (РАН) подписали долгосрочное Соглашение и утвердили Комплексную программу фундаментальных научных исследований и разработок в области водородных технологий, топливных элементов и возобновляемых источников энергии, направленную на создание научно-технического и технологического задела по инновационным энергетическим проектам.

Основная цель этой программы состоит в том, чтобы исследовать, разработать и выбрать конкурентоспособные технологии, пригодные для массового производства эффективных электрохимических энергетических установок на топливных элементах, дешевых способов производства, хранения, аккумулирования и распределения водорода, а также высокоэффективных возобновляемых источников энергии. Она охватывает практически весь спектр инновационных энергетических и водородных технологий и направлена на ускоренную трансформацию результатов фундаментальных научных исследований и разработок в этих областях в конкурентоспособную наукоемкую продукцию, имеющую высокий потенциал рыночной коммерциализации.

В рамках этой программы объединены и скоординированы усилия лучших научных организаций РАН, государственных научных центров, конструкторских бюро и промышленных предприятий. Над решением научных проблем и созданием ключевых компонентов инновационных энергетических и водородных технологий принимают участие около 120 научных и конструкторских организаций страны.

**Ключевые компоненты водородной инфраструктуры включают в себя:**

генераторы водорода,  
топливные процессоры,  
устройства хранения и аккумуляирования водорода,  
интегрированные (гибридные) энергетические установки на базе топливных элементов, электролизеров, солнечных фотопреобразователей и ветротурбин.

Достигнутые по ряду технологий результаты позволили перейти к разработке принципиально новых энергетических установок на топливных элементах для электро- и теплоснабжения различных объектов жилищно-коммунальной и социальной сферы, нефтегазового комплекса, для системы автономного распределенного энергоснабжения, в том числе с использованием в качестве первичного источника энергии солнечных фотопреобразователей.

Выбор эффективных первичных источников энергии, которые должны заменить исчерпаемые природные ресурсы органического топлива, является принципиальным вопросом построения и развития энергетической системы будущего. В ближайшие 30...40 лет можно рассчитывать только на солнечную энергию (и производную от нее энергию ветра) как наиболее доступную для ускоренного развития эффективных и конкурентоспособных солнечно-водородных технологий и энергетических систем.

Объединение солнечной энергии и водорода позволяет в значительной степени ослабить серьезные недостатки солнечной энергии, пока еще ограничивающие ее широкое применение – непостоянство во времени (суточные, сезонные и погодные колебания) и относительно невысокая плотность солнечного энергетического потока, которая к тому же существенно варьируется в зависимости от широты места на поверхности Земли.

**Для того чтобы быть использованной во всех возможных областях потребления, солнечная энергия нуждается в посреднике – энергоносителе, который мог бы донести вырабатываемую солнечную энергию в то место, где она нужна, и в том виде, в котором она может быть использована. Таким энергоносителем может быть только водород, получаемый из воды.**

Анализ эффективности и конкурентоспособности отечественных и зарубежных технологий использования солнечной энергии показывает, что наибольшим потенциалом конкурентоспособности обладают

концентраторные солнечные батареи с гетероструктурными фотопреобразователями на основе арсенида галлия. Целесообразно создание автономных интегрированных (гибридных) электрохимических энергетических установок на топливных элементах с использованием в качестве первичного источника энергии концентраторных солнечных батарей с такими гетероструктурными фотопреобразователями и ветротурбин, в которых для накопления вырабатываемой энергии используется реверсивная система электролизер - топливный элемент.

Произведённые в электролизерах водород и кислород используются для выработки электричества батареями топливных элементов в те периоды, когда отсутствует солнечная или ветровая энергия. Электролитическое производство водорода (и кислорода) совместно с топливными элементами, работающими на этих водороде и кислороде (воздухе), является эффективной технологической основой практического применения неустойчивых по своей природе солнечной и ветровой энергии при выработке электроэнергии для обеспечения автономного энергопитания различных объектов, удаленных от систем централизованного энергоснабжения, а также как источники бесперебойного питания.

Большие возможности хранения водорода в таких системах по сравнению с консервацией электричества в аккумуляторах способствуют выравниванию и балансу меняющихся нагрузок, характерных для солнечной и ветровой энергии, и позволяют использовать энергоресурсы, максимально адаптированные к региональным особенностям, более гибко сочетать централизованные и децентрализованные источники энергии, особенно для отдаленных мест и объектов (северных территорий, горных поселений, фермерских хозяйств, островов и т.п.).

### **Контрольные вопросы**

1. Какими способами производится водород?
2. Какой способ получения водорода является наиболее отработанным?
3. Какими способами получают водород из биомассы?
4. Какие технические преграды стоят на пути использования водорода?
5. Почему топливные элементы относятся к химическим источникам тока?
6. Подпадает ли под ограничения второго закона термодинамики эффективность топливных элементов?
7. Как работает топливный элемент?
8. Участвуют ли электроды и электролит топливного элемента в преобразовании энергии окислительно-восстановительной реакции в электрическую?
9. Какие вещества используют в качестве топлива в топливном элементе?

10. Каким образом поддерживается длительная работа топливных элементов?
11. Что является продуктами работы топливного элемента?
12. Какое напряжение, возникает на отдельном топливном элементе?
13. Что называется электрохимическим генератором?
14. Охарактеризуйте щелочные топливные элементы.
15. Дайте характеристику топливным элементам с ионообменной мембраной.
16. Охарактеризуйте топливные элементы на фосфорной кислоте.
17. Расскажите о топливных элементах с прямым окислением метанола.
18. Дайте характеристику топливным элементам с электролитом из расплава карбоната лития и натрия.
19. Охарактеризуйте топливные элементы с твёрдым электролитом.
20. Где могут использоваться топливные элементы?
21. Почему топливные элементы являются самыми эффективными преобразователями водорода?
22. Почему водород считается наиболее подходящим топливом для использования топливных элементов на автомобилях?
23. Какие преимущества у топливных элементов по сравнению с источниками автономного электропитания для портативной электроники?
24. Перечислите преимущества топливных элементов по сравнению с другими источниками энергии.

## 2. Контрольные работы

### 2.1 Контрольная работа №1

Объём контрольной работы: решить задачу, ответить на 5 контрольных вопросов, отметить правильные ответы в тесте (в контрольной таблице).

#### Задача

Рассчитать диаметр и частоту вращения ветроколеса с горизонтальной осью для района (по выбору из рисунка 3.3) мощностью  $P = XY$  кВт или  $P = 0,XY$  кВт, где  $X Y$  – последние цифры зачетной книжки. Число лопастей выбирается произвольно. Среднегодовую скорость ветра выбрать произвольно для любого населенного пункта из таблицы 3.2

Таблица 3.2 - Данные о среднемесячных и среднегодовых скоростях ветра в естественных условиях для территории Башкортостана

Метеостанция	Месяцы												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Аксаково	4,4	4,3	4,6	3,7	3,9	3,5	3,0	2,8	3,4	4,2	4,0	4,5	3,9
Акъяр	4,3	4,5	5,0	4,1	4,3	3,8	3,8	3,5	3,5	4,1	4,1	4,0	4,1
Андреерка	4,1	4,2	4,5	3,8	3,8	3,4	2,9	2,9	3,5	3,9	4,0	4,0	3,8
Архангельское	3,1	3,0	3,6	3,1	3,5	2,9	2,5	2,4	3,2	3,6	3,2	3,4	3,1
Аскино	3,2	3,1	3,6	2,7	3,2	2,9	2,4	2,2	2,8	3,4	3,1	3,3	3,0
Баймак	3,4	4,0	4,0	3,7	4,1	3,8	3,4	3,3	3,7	4,3	3,7	3,7	3,8
Бакалы	2,9	2,9	3,2	2,9	3,9	2,8	2,3	2,1	2,6	3,1	3,0	3,0	2,8
Башгосзаповедник	1,7	2,1	2,5	2,5	2,8	2,2	2,5	2,1	2,3	2,4	1,9	1,7	2,2
Белорецк	3,3	3,6	4,3	3,7	3,7	3,1	2,6	2,4	3,1	3,9	3,5	3,4	3,4
Бирск	5,0	4,9	5,1	4,2	4,5	3,8	3,4	3,3	3,9	4,6	4,4	4,6	4,3
Верхотор	2,8	2,8	3,8	2,9	3,7	2,8	2,3	2,2	2,7	3,4	2,8	2,9	2,9
Дуван	3,6	3,7	4,2	3,6	3,8	3,4	2,8	2,6	3,3	3,8	3,6	3,9	3,5
Емаши	3,9	3,8	3,9	3,1	3,5	3,2	2,4	2,3	3,2	4,0	3,8	4,1	3,4
Зилаир	2,6	2,7	3,3	2,9	3,2	2,6	2,5	2,5	2,4	2,7	2,6	2,7	2,7
Инзер	1,3	1,5	1,9	1,7	2,0	1,7	1,4	1,3	1,5	1,7	1,3	1,3	1,6
Кананикольское	2,7	2,9	3,6	3,4	3,4	2,9	2,7	2,5	3,0	3,4	2,7	2,6	3,0

Методические указания к решению задачи в практическом занятии 3.



**Ответить на 5 теоретических вопроса.** Номера вопросов: № варианта; (№ варианта +40); (№ варианта +80); (№ варианта +120); (№ варианта +160).  
№ варианта - № по порядку в учебном журнале.

### **Контрольные вопросы**

11. Что собой представляет фотоэлектрическая система?
12. Каков состав необходимого оборудования для ФЭС?
13. По каким параметрам выбирается мощность фотоэлектрических модулей?
14. Дать определение понятию «мощность солнечного излучения».
15. Как рассчитать и выбрать емкость аккумуляторной батареи?
16. От чего зависит стоимость фотоэлектрической системы?
17. Устройство и принцип действия гелиоэнергетической установки.
18. Как рассчитать теплопроизводительность гелиоустановки? От чего она зависит?
19. Влияние угла наклона плоскости солнечного коллектора на теплопроизводительность гелиоустановки.
20. Какие коэффициенты используются для оценки энергетических показателей системы горячего водоснабжения?
21. Что такое условное топливо?
22. Какими показателями можно оценить экономическую эффективность ГЭУ?
23. Дать определения понятиям «валовой», «технический» и «экономический» потенциалы ветровой энергии.
24. Какие функции распределения случайной величины вы знаете?
25. Какая функция распределения наиболее точно описывает распределение скорости ветра?
26. Как определяется вероятностное распределение скорости ветрового потока?
27. От чего зависит мощность ветрового потока и производительность ветроэнергетической установки?
28. Классификация установок для малой гидроэнергетики.
29. Преимущества и недостатки малой гидроэнергетики. Основные отличия малой энергетики от традиционной.
30. В чем состоит суть метода линейного учета для расчета теоретического потенциала водотока.
31. Назовите основные факторы влияния МГЭ на окружающую среду.
32. Как рассчитать мощность свободнопоточных погружных агрегатов МГЭС?
33. Принцип действия теплового насоса.
34. Назовите возможные низкопотенциальные источники энергии.

35. Какие исходные данные нужны для расчета мощности теплового насоса?
36. По каким параметрам выбирается тепловой насос? Дать определение этим параметрам.
37. С какой целью проводится гидравлический расчет трубопроводов системы водяного отопления?
38. Как рассчитать длину горизонтального коллектора и скважин земляного зонда?
39. От чего зависит удельный теплосъем коллектора и зонда?
40. Основные характеристики биогаза
41. Принцип работы биогазовой установки.
42. Назовите основные способы переработки биомассы?
43. Какова эффективность сжигания биотоплива? Как её можно повысить?
44. В чём сущность анаэробного сбраживания?
45. Какова эффективность анаэробной переработки навоза?
46. Классификация возобновляемых источников энергии.
47. Модель потребности общества в энергии.
48. Потенциал ВИЭ, эффективность использования различных их видов.
49. Сравнение характеристик ВИЭ и НИЭ.
50. Научные принципы использования ВИЭ: анализ, временные характеристики, качество, комплексный подход к планированию энергетики.
51. Технические, социально-экономические и экологические проблемы использования ВИЭ.
52. Солнечное излучение и его характеристики. Области солнечного спектра.
53. Прямые лучи и рассеянное излучение. Облученность.
54. Парниковый эффект.
55. Приборы для измерения лучистых потоков.
56. Нагревание воды солнечным излучением.
57. Типы солнечных нагревателей.
58. Открытые солнечные нагреватели.
59. Черные резервуары солнечных нагревателей.
60. Проточные солнечные нагреватели.
61. Селективные поверхности солнечных нагревателей.
62. Вакууммированные приемники солнечных нагревателей.
63. Подогреватели воздуха, использующие солнечную энергию.
64. Сушильные камеры на солнечной энергии.
65. Солнечные отопительные системы (пассивные и активные).
66. Солнечные пруды.
67. Солнечная энергия для охлаждения воздуха.
68. Абсорбционные холодильные установки на солнечной энергии.
69. Коэффициент теплоиспользования солнечной энергии.

70. Опреснение воды на солнечной энергии.
71. Концентраторы солнечной энергии.
72. Параболический вогнутый концентратор солнечной энергии.
73. Солнечные системы для получения электроэнергии.
74. Рассредоточенные коллекторы и солнечные башни.
75. Фотоэлектрическая генерация.
76. Фотоэлементы и их характеристики.
77. «Электронный газ». Работа выхода электронов.
78. Проводники и полупроводники.
79. Вольтамперные характеристики и теоретический КПД кремниевой батареи.
80. Ветер и его характеристики. Сила ветра. Определение средней скорости ветра.
81. Классификация ветроустановок.
82. Ветроэнергетический кадастр.
83. Основы теории ВЭУ. Три закона аэродинамики.
84. Располагаемая мощность ветроколеса.
85. Коэффициент мощности ветроколеса.
86. Коэффициент торможения потока ветроколеса.
87. Нагрузка на ветроколесо. Лобовое давление.
88. Коэффициент лобового давления на ветроколесо.
89. Крутящий момент ветроколеса. Коэффициент крутящего момента.
90. Режимы работы ветроколеса.
91. Классификация ВЭУ.
92. Техникоэкономическое обоснование параметров ВЭС.
93. Экологические проблемы ветроэнергетики.
94. Малые ГЭС. Гидроэнергетический потенциал России.
95. Основные принципы использования энергии воды.
96. Мощность водяного потока.
97. Оборудование ГЭС.
98. Активные и реактивные гидротурбины.
99. Гидравлический таран.
100. Экология гидроэнергетики. Экология малых ГЭС.
101. Энергия волн. Характеристики волнового движения. Амплитуда. Мощность волнового движения. Скорость перемещения волны.
102. Устройства для преобразования энергии волн. Утка Солтера. Колеблющийся водяной столб.
103. Энергия приливов. Периоды колебаний уровня воды.
104. Причины возникновения приливов. Лунные и солнечные приливы.
105. Технико-экономические и экологические проблемы ПЭС.
106. Преобразование тепловой энергии океана.

107. Термин «преобразование тепловой энергии океана» (ОТЕС) – «ocean thermal energy conversion»
108. ОТЭС замкнутого цикла. Мощность ОТЭС.
109. Экологические и техникоэкономические проблемы ОТЭС. Выбор рабочих тел.
110. ОТЭС открытого цикла.
111. Комбинированная выработка электроэнергии и пресной воды.
112. Технические трудности создания ОТЭС открытого цикла.
113. Арктические ОТЭС. Определение мощности. Экологические проблемы.
114. Фотосинтез и его эффективность.
115. Световые и темновые реакции.
116. Биомасса. Биотопливо.
117. Система планетарного кругооборота биомассы.
118. Классификация биотоплива и его энергетические характеристики. Влагосодержание, плотность, теплота сгорания.
119. Основные процессы переработки биомассы: термохимические, Биохимические, агрохимические.
120. Производство биомассы для энергетических целей.
121. Энергетические фермы.
122. Кругооборот энергии и вещества.
123. Потенциал биотоплива в России.
124. Техничко-экономические и экологические показатели процессов переработки биомассы.
125. Сжигание биомассы.
126. Пиролиз биомассы.
127. Газификация биомассы.
128. Спиртовая ферментация биомассы.
129. Анаэробное сбраживание биомассы.
130. Биогазогенераторы.
131. Геотермальная энергия и ее свойства.
132. Строение Земли. Классификация геотермальных районов.
133. ГеоТЭС. Экологические проблемы строительства ГеоТЭС.
134. Системы генерации электроэнергии на ГеоТЭС.
135. Комбинированная выработка электроэнергии, тепла, пресной воды и минеральных веществ.
136. Оценка мощности ГеоТЭС.
137. Аккумулирование энергии.
138. Биологическое аккумулирование энергии. Водород. Аммиак.
139. Аккумулирование тепла, электроэнергии.
140. Топливные элементы.
141. Механическое аккумулирование: вода, сжатый воздух, маховики.
142. Передача энергии.
143. Газопроводы.

144. Передача электроэнергии.
145. Транспорт биомассы.
146. Теплотрассы.
147. Нефтепроводы.
148. Характеристика ультрафиолетового, видимого и инфракрасного из-
149. лучения.
150. Спектральное распределение солнечного излучения.
151. Устойчивость и работа плоского коллектора солнечной энергии.
152. Устойчивость и работа солнечной водонагревательной установки с принудительной циркуляцией.
153. Устройство и работа солнечной сушильной установки.
154. Устройство и работа солнечного дистиллятора.
155. Работа пассивных устройств при использовании солнечного тепла для отопления домов.
156. Характеристика и применение гелиоконцентраторов.
157. Устройство и работа солнечной электростанции.
158. Устройство и работа солнечного элемента с р-п переходом.
159. Преимущества и недостатки фотоэлектрических преобразователей.
160. Принцип действия солнечного термоэлектрического генератора.
161. Устройство и работа солнечной термоэмиссионной установки.
162. Мощность воздушного потока, проходящего через ветроколесо.
163. Почему в механическую работу можно превратить только часть энергии потока, протекающего через ветроколесо?
164. Устройство и работа ветроэнергетической установки.
165. Потенциальные источники энергии для малой гидроэнергетики.
166. В каких случаях применяют и как работает активная гидротурбина?
167. В каких случаях применяют и как работает реактивная гидротурбина?
168. Почему в реактивных гидротурбинах может возникнуть кавитация?
169. Устройство типичной гидроэлектростанции.
170. Химический состав биомассы.
171. Виды биомассы, используемые в качестве источника энергии.
172. Типы котлов с автоматической подачей для щепы и гранул.
173. Процесс получения древесного угля с помощью пиролиза.
174. Химические реакции окисления углерода при газификации биотоплив.
175. Процесс образования горючего газа в газогенераторе.
176. Гидролиз растительных материалов.
177. Опишите процесс спиртовой ферментации.

178. Получение метана из органических отходов при анаэробном сбраживании.
179. Источники геотермальной энергии.
180. Как работает геотермальная электростанция с конденсационной турбиной?
181. Как работает геотермальная электростанция с бинарным циклом?
182. Как работает система геотермального теплоснабжения с теплообменниками?
183. Какие естественные и искусственные источники низкопотенциального тепла могут быть использованы для отопления и горячего водоснабжения?
184. Устройство и принцип действия теплового насоса.
185. Почему для тепловых насосов подбирают рабочие тела, изменяющие агрегатное состояние при необходимых температурах и давлениях?
186. Каким образом тепловой насос может снабжать холодом систему кондиционирования?
187. Какие способы применяют для прокладки труб в земле, если она служит источником тепла для тепловых насосов?
188. Как осуществляется прокладка труб при использовании тепловых насосов с горизонтальным коллектором?
189. Опишите схему отопления при использовании тепловыми насосами тепла водоёмов.
190. Причины возникновения приливов.
191. Как работает однобассейновая приливная электростанция двустороннего действия?
192. Какую часть мощности волнения можно преобразовать в механическую энергию?
193. Опишите работу волновой установки с пневматическим преобразователем.
194. Как работает промышленная волновая электростанция в Португалии?
195. Приведите и объясните схему океанской термальной электростанции, работающей по замкнутому циклу.
196. Приведите и объясните схему океанской термальной электростанции, работающей по открытому циклу Клода.
197. Приведите и объясните схему арктической океанской термальной электростанции, работающей на перепаде температур океан-атмосфера
198. Приведите и объясните схему океанской термальной электростанции с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую.
199. Какими способами производится водород?
200. Как работает топливный элемент?
201. Какие применяются типы топливных элементов?

202. Где могут использоваться топливные элементы?
203. Почему топливные элементы являются самыми эффективными преобразователями водорода?
204. Перечислите преимущества топливных элементов по сравнению с другими источниками энергии.

## ТЕСТ

В контрольной таблице 2.1 отметить правильные ответы на вопросы

1. Какая температура внешних неактивных слоёв Солнца?
- 1) 10000 К;
  - 2) 5900 К;
  - 3) 3800 К.
2. Какая длина волны у видимого солнечного излучения?
- 1)  $\lambda = 0,4 - 0,7$  мкм;
  - 2)  $\lambda = 0,2 - 0,4$  мкм;
  - 3)  $\lambda > 0,7$  мкм.
3. Из чего состоит поток поступающего на Землю солнечного излучения?
- 1) как из прямого потока, так и из рассеянного атмосферой излучения;
  - 2) только из прямого потока;
  - 3) только из рассеянного атмосферой излучения.
4. Чему равна наибольшая интегральная плотность потока солнечного излучения, приходящего на Землю?
- 1)  $E \approx 3$  кВт/м<sup>2</sup>;
  - 2)  $E \approx 2$  кВт/м<sup>2</sup>;
  - 3)  $E \approx 1$  кВт/м<sup>2</sup>.
5. Чему равна энергия фотонов в максимуме спектрального распределения солнечного излучения?
- 1)  $h\nu = 1,24/\lambda \approx 2$  эВ;
  - 2)  $h\nu = 1,24/\lambda \approx 3$  эВ;
  - 3)  $h\nu = 1,24/\lambda \approx 4$  эВ.
6. Сколько процентов общего годового энергопотребления расходуется на отопление, горячее водоснабжение и кондиционирование воздуха?
- 1) 20 - 25%;
  - 2) 30 - 35%;
  - 3) 40 - 45%.

7. Какие способы использования солнечного излучения применяются для отопления?

- 1) только активные;
- 2) только пассивные;
- 3) активные и пассивные.

8. До каких температур преобразовывает солнечное излучение в теплоту плоский коллектор солнечной энергии?

- 1) до 300°C;
- 2) до 200°C;
- 3) до 100°C.

9. Какой коэффициент поглощения солнечного излучения имеет слой селективного покрытия в плоских солнечных коллекторах?

- 1)  $\alpha_\lambda = 0,90 - 0,92$ ;
- 2)  $\alpha_\lambda = 0,94 - 0,96$ ;
- 3)  $\alpha_\lambda = 0,97 - 0,99$ .

10. Какое солнечное излучение улавливает плоский коллектор солнечной энергии?

- 1) только рассеянное;
- 2) прямое и рассеянное;
- 3) только прямое.

11. Чему равен диапазон типичных значений коэффициента теплопотерь плоского коллектора солнечной энергии?

- 1)  $K_k = 1,2 - 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- 2)  $K_k = 0,6 - 1,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- 3)  $K_k = 0,2 - 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

12. Чему равен средний годовой эксплуатационный КПД плоского коллектора солнечной энергии?

- 1) 10-20%;
- 2) 30-50%;
- 3) 60-90%.

13. Какая производительность солнечного опреснителя типа «горячий ящик»?

- 1) 10-12 л/м<sup>2</sup> · в сутки;
- 2) 6-9 л/ м<sup>2</sup> · в сутки;
- 3) 3-5 л/ м<sup>2</sup> · в сутки.

14. Как осуществляется движение теплоносителя (воздуха) в пассивных системах отопления?



- 1) за счёт вынужденного движения;
- 2) за счёт естественной конвекции;
- 3) за счёт вынужденного движения и естественной конвекции.

15. До какой температуры можно нагреть небольшой участок, на котором концентрируются солнечные лучи гелиоконцентраторами?

- 1) до  $3600^{\circ}\text{C}$ ;
- 2) до  $2600^{\circ}\text{C}$ ;
- 3) до  $5600^{\circ}\text{C}$

16. На основе какого материала изготавливаются солнечные элементы?

- 1) на основе лития;
- 2) на основе хрома;
- 3) на основе кремния.

17. При освещении каким светом возникает фотоэлектрический эффект в солнечном элементе?

- 1) в видимой и ближней инфракрасной областях;
- 2) в ультрафиолетовой и дальней инфракрасной областях;
- 3) в ультрафиолетовой области.

18. Чему равен КПД современных промышленных фотопреобразователей?

- 1) 6 – 8%;
- 2) 10 – 12%;
- 3) 16 – 18%.

19. Какая ширина запрещённой зоны у арсенида галлия?

- 1)  $E_g = 1,43$  эВ;
- 2)  $E_g = 2,43$  эВ;
- 3)  $E_g = 3,43$  эВ.

20. Чему равен КПД лучших солнечных термоэлектрических генераторов?

- 1) около 10%;
- 2) около 15%;
- 3) около 20%.

21. В какое время года скорость ветра обычно выше?

- 1) в весенние месяцы;
- 2) в летние месяцы;
- 3) в зимние месяцы.

22. От чего зависит кинетическая энергия ветра?

- 1) от его массы и скорости;
- 2) от его массы;
- 3) от его скорости.

23. Какой может быть скорость потока за ветроколесом?

- 1) может быть любой;
- 2) может быть равна нулю;
- 3) не может быть равна нулю.

24. Чему равен коэффициент использования энергии ветра для лучших быстроходных ветродвигателей?

- 1)  $\xi = 0,38$ ;
- 2)  $\xi = 0,48$ ;
- 3)  $\xi = 0,58$ .

25. Какие ветродвигатели получили преимущественное распространение?

- 1) карусельные, у которых ось ветроколеса вертикальна;
- 2) крыльчатые, у которых ось ветроколеса горизонтальна;
- 3) барабанные, у которых ось ветроколеса вертикальна.

26. Зависит ли мощность, развиваемая ветроколесом, от его диаметра?

- 1) не зависит;
- 2) не всегда зависит;
- 3) зависит.

27. Сколько электроэнергии производят гидроэлектростанции России?

- 1) 13%;
- 2) 23%;
- 3) 33%.

28. Какие гидроэнергетические агрегаты относят к малым ГЭС?

- 1) от 100 кВт до 10 МВт;
- 2) от 20 МВт до 30 МВт;
- 3) от 40 МВт до 50 МВт.

29. Какого значения достигает КПД гидротурбин?

- 1) 50%;
- 2) 70%;
- 3) 90%.

30. Как подводится вода к рабочему колесу в активных гидротурбинах?

- 1) через направляющий аппарат;
- 2) через сопла;

3) частично через направляющий аппарат, а частично – через сопла.

31. Когда целесообразно применять реактивные гидротурбины?

- 1) при больших напорах и небольших расходах воды в реке;
- 2) при больших напорах и больших расходах воды в реке;
- 3) при небольших напорах и больших расходах воды в реке.

32. В каких гидротурбинах может возникнуть кавитация?

- 1) в реактивных;
- 2) в активных;
- 3) в реактивных и активных.

33. Какую долю потребляемой энергии обеспечивает биомасса?

- 1) 32%;
- 2) 22%;
- 3) 12%.

34. Какое количество твёрдых бытовых отходов образуется ежегодно России?

- 1) 40 млн т;
- 2) 60 млн т;
- 3) 80 млн т.

35. Сколько воды содержится в высушенной в течение нескольких лет древесине?

- 1) от 5 до 10% воды в клеточной структуре;
- 2) от 15 до 20% воды в клеточной структуре;
- 3) от 25 до 30% воды в клеточной структуре.

Таблица 2.1 – Контроль правильных ответов на тест -1

№ вопр	№ правильного ответа			№ вопр	№ правильного ответа			№ вопр	№ правильного ответа			№ вопр	№ правильного ответа						
	1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3				
1				6				15				22				29			
2				9				16				23				30			
3				10				17				24				31			
4				11				18				25				32			
5				12				19				26				33			
6				13				20				27				34			
7				14				21				28				35			

Число правильных ответов: \_\_\_\_\_

## 2.2 Контрольная работа №2

Объём контрольной работы: решить задачу, ответить на 5 контрольных вопросов, отметить правильные ответы в тесте (в контрольной таблице).

### Задача

Определить суточный выход биогаза  $V_T$  в установке, утилизирующей навоз от  $n$  коров, мощность  $P$  устройства, использующего биогаз, и объём биогазогенератора  $V_6$ . Время цикла сбраживания  $\tau = 15$  суток при температуре  $t = 30^\circ\text{C}$ . Подача сухого сбраживаемого материала от одного животного идёт со скоростью  $m = 2\text{ кг/сут}$ . Плотность сбраживаемого сухого материала  $\rho = 50\text{ кг/м}^3$ . Выход биогаза на 1 кг сбраживаемого сухого материала при нормальных условиях и при расходе 5 кг сухой биомассы на  $1\text{ м}^3$  воды составляет  $v_T 0,3\text{ м}^3/\text{кг}$ . Объёмная доля метана в биогазе составляет  $C_{\text{CH}_4} = 65\%$ , углекислого газа –  $C_{\text{CO}_2} = 35\%$ . КПД горелочного устройства  $\eta$  %. Жидкая биомасса содержит  $W = 95\%$  воды. Теплота сгорания метана составляет  $Q_{\text{н}^p} = 35,82\text{ МДж/м}^3$ .

Задания по вариантам в таблице 2.2.

Методические указания по решению задачи в практическом занятии №4.

Таблица 2.2 – Варианты заданий

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n$ Количество коров, шт	25	30	35	40	45	20	50	28	33	42
$\eta$ КПД котла, %	60	65	55	58	57	50	52	63	48	56

**Ответить на 5 теоретических вопроса.** Номера вопросов: № варианта +20; (№ варианта +60); (№ варианта +100); (№ варианта +140); (№ варианта +180).

Вопросы в контрольной работе №1.

№ варианта – это № по порядку в учебном журнале.

### ТЕСТ-2

В контрольной таблице 2.2 отметить правильные ответы на вопросы.

36. Какого размера делают древесные гранулы для сжигания в котлах?

- 1) 7–9 см в длину и около 3 см в диаметре;
- 2) 4–6 см в длину и около 2 см в диаметре;
- 3) 1–3 см в длину и около 1 см в диаметре.

37. Сколько тонн древесины требуется для производства 1 т древесного угля?

- 1) 4-10 т;
- 2) 2-3 т;

3) 1,5- 2 т.

38. Каких значений достигает КПД пиролиза в лучших установках?

- 1) 40-50%;
- 2) 60-70%;
- 3) 80-90%.

39. Сколько литров этилового спирта получают методом гидролиза из одной тонны древесного сырья?

- 1) 75 литров;
- 2) 175 литров;
- 3) 275 литров.

40. При какой концентрации этилового спирта погибают дрожжи?

- 1) выше 10%;
- 2) выше 15%;
- 3) выше 20%.

41. Сколько метана и углекислого газа содержится в биогазе?

- 1) в среднем 70% метана и 30% углекислого газа;
- 2) в среднем 60% метана и 40% углекислого газа;
- 3) в среднем 50% метана и 50% углекислого газа.

42. Чему равен КПД превращения энергии органических веществ в биогаз?

- 1) 40-50%;
- 2) 60-70%;
- 3) 80-90%.

43. Чему равен средний поток геотермального тепла через земную поверхность?

- 1) 0,06 Вт/м<sup>2</sup>;
- 2) 0,6 Вт/м<sup>2</sup>;
- 3) 6 Вт/м<sup>2</sup>.

44. Какой должна быть температура воды для отопления и горячего водоснабжения?

- 1) не ниже 50<sup>0</sup>С;
- 2) не ниже 60<sup>0</sup>С;
- 3) не ниже 70<sup>0</sup>С.

45. Какую долю котельно-печного топлива потребляют отопительные котельные?

- 1) более половины всего котельно-печного топлива;

- 2) менее половины всего котельно-печного топлива;
- 3) более трёх четвертей всего котельно-печного топлива.

46. Сколько потребляет энергии компрессор теплового насоса по сравнению с энергией, которую он подаёт в систему отопления?

- 1) потребляет в 1,5-2 раза меньше, чем подаёт;
- 2) потребляет в 3-5 раз меньше, чем подаёт;
- 3) потребляет в 6-7 раз меньше, чем подаёт.

47. Какие рабочие тела (хладагенты) наиболее распространены в тепловых насосах?

- 1) аммиак;
- 2) фреоны;
- 3) пропан.

48. Какая температура грунта постоянно держится на глубине более 15 метров?

- 1) 8-10<sup>0</sup>С;
- 2) 12-14<sup>0</sup>С;
- 3) 16-18<sup>0</sup>С.

49. Чему равен КПД преобразования энергии приливного течения в электрическую энергию?

- 1) 80%;
- 2) 60%;
- 3) 40%.

50. Во сколько раз удельная плотность энергии морских волн больше энергии ветра?

- 1) в 5 раз;
- 2) в 10 раз;
- 3) в 15 раз.

51. Как движется каждая частица жидкости в волне?

- 1) по синусоиде;
- 2) по эллипсу;
- 3) по окружности.

52. От чего зависит мощность, несущая волнами?

- 1) прямо пропорциональна квадрату амплитуды и периоду;
- 2) обратно пропорциональна квадрату амплитуды и периоду;
- 3) обратно пропорциональна амплитуде и периоду.

53. При какой удельной мощности волн могут эффективно работать волновые станции?

- 1) около 60 кВт/м;
- 2) около 80 кВт/м;
- 3) около 100 кВт/м.

54. За счёт каких процессов прогреваются первые 10 м водной толщи, поглощающей солнечное излучение?

- 1) за счёт теплопроводности;
- 2) за счёт турбулентного перемешивания;
- 3) за счёт теплопроводности и турбулентного перемешивания.

55. Чему равна максимальная разность температур между поверхностными и придонными водами?

- 1) около 20<sup>0</sup>С;
- 2) около 30<sup>0</sup>С;
- 3) около 40<sup>0</sup>С.

56. Какая температура воды подо льдом в Арктике?

- 1) +6 - +7<sup>0</sup>С;
- 2) +4 - +5<sup>0</sup>С;
- 3) +2 - +3<sup>0</sup>С.

57. Чему равен максимальный теоретический КПД океанской термальной электростанции, работающей по замкнутому циклу?

- 1) 2-4%;
- 2) 5-9%;
- 3) 10-14%.

58. До каких глубин сказывается волновое движение в океане?

- 1) примерно до 10 м;
- 2) примерно до 15 м;
- 3) примерно до 20 м.

59. Какой способ получения водорода самый распространённый?

- 1) химические реакции;
- 2) электролиз;
- 3) термическое разложение воды.

60. За счёт чего ожидается повышение эффективности электролиза?

- 1) за счёт применения катализаторов;
- 2) за счёт применения газогенераторов;
- 3) за счёт применения газоанализаторов.

61. До какой температуры нагревают биомассу при термохимическом методе получения водорода?

- 1) до 150-400<sup>0</sup>С;
- 2) до 500-800<sup>0</sup>С;
- 3) до 850-900<sup>0</sup>С.

62. При какой температуре водород может быть сжижен?

- 1) при 40 К;
- 2) при 30 К;
- 3) при 20 К.

63. Подпадает ли под ограничения второго закона термодинамики эффективность топливных элементов?

- 1) всегда подпадает;
- 2) иногда подпадает;
- 3) не подпадает.

64. Какие вещества используют в своей работе топливные элементы?

- 1) водород и кислород;
- 2) пропан и кислород;
- 3) этилен и кислород.

65. Из какого внешнего источника топлива выделяют водород при использовании топливных элементов на транспорте?

- 1) из этанола;
- 2) из метанола;
- 3) из сахарозы.

66. Что являются продуктами работы топливного элемента?

- 1) тепло и углекислый газ;
- 2) только тепло;
- 3) тепло и вода.

67. Какое напряжение возникает на отдельном топливном элементе?

- 1) не превышает 1,1 вольта;
- 2) не превышает 2,1 вольта;
- 3) не превышает 3,1 вольта.

68. Что выступает в роли источника водорода в теле человека и животных?

- 1) вода;
- 2) воздух;
- 3) пища.



69. Чему равен КПД топливных элементов с ионообменной мембраной?

- 1) 20-30%;
- 2) 40-50%;
- 3) 60-70%.

70. Какую рабочую температуру имеют топливные элементы с твёрдым электролитом (SOFC)?

- 1) от 800 до 1000<sup>0</sup>С;
- 2) от 600 до 700<sup>0</sup>С;
- 3) от 400 до 500<sup>0</sup>С

Таблица 2.2 – Контроль правильных ответов на тест -2

№ вопр	№ правильного ответа			№ вопр	№ правильного ответа			№ вопр	№ правильного ответа			№ вопр	№ правильного ответа			№ вопр	№ правильного ответа		
	1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3
36				43				50				57				64			
37				44				51				68				65			
38				45				52				59				66			
39				46				53				60				67			
40				47				54				61				68			
41				48				55				62				69			
42				49				56				63				70			

Число правильных ответов: \_\_\_\_\_

### Список рекомендуемой литературы

1. Гужулев Э.П., Горюнов В.Н., Лаптий А.П. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: Монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004. – 272 с.
2. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ.- М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
3. Васильев Ю.С., Хрисанов Н.И. Экология использования возобновляющихся энергоисточников. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 343 с.
4. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения /Р.Р. Аvezов, М.А. Барский-Зорин, И.М. Васильева и др.; Под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. - М.: Стройиздат, 1990. – 328 с.
5. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
6. Выбороков Б.М. Геотермальные электростанции. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 112 с.
7. Геотермальное теплоснабжение /А.Г. Гаджиев, Ю.Н. Султанов, П.Н. Ригер и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
8. Малая гидроэнергетика /Под ред. Б.Н. Фельдмана. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 180 с.
9. Биомасса - как источник энергии Под ред. С. Соуфера, О. Заборски. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
10. Рей Д., Макмайкл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
11. Бартош Е.Т. Тепловые насосы в энергетике железнодорожного транспорта. – М.: Транспорт, 1985. – 280 с.
12. Бернштейн Л.Б., Силаков В.Н., Гульфер С.П. и др. Приливные электростанции. – М.: Энергоиздат, 1987. – 296 с.
13. Андриященко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 319 с.
14. Коробков В.А. Преобразование энергии океана. – Л.: Судостроение, 1986. – 280 с.
15. Сичкарёв В.И., Акуличев В.А. Волновые энергетические станции в океане.- М.: Наука, 1989. – 132 с.
16. Мак-Кормик М. Преобразование энергии волн: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 137 с.
17. Бокрис Дж.О.М., Везироглу Т.Н., Смит Д.Л. Солнечноводородная энергия. Сила, способная спасти мир / Пер. с англ. Д.О. Дуникова. - М.: Издательство МЭИ, 2002. – 164 с.
18. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.

19. Перспективы и проблемы развития водородной энергетики и топливных элементов. Горно-металлургическая компания «Норильский никель». – [www.nornik.ru/\\_upload/listrec\\_land/031110\\_Presentation\\_cells\\_1\(2\).pdf](http://www.nornik.ru/_upload/listrec_land/031110_Presentation_cells_1(2).pdf)

20. Водородная энергетика и топливные элементы. Заключительный отчёт экспертной группы Европейской комиссии.–Брюссель, 2003.–36 с. [www.europa.eu.int/comm/energy\\_transport/en/cut\\_en.html](http://www.europa.eu.int/comm/energy_transport/en/cut_en.html).

21. Берман Э. Геотермальная энергия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

		Лист
1.	<b>ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ</b>	3
1.1	<b>Практическое занятие 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ</b>	3
1.1.1	Общие сведения	3
1.1.2	Расчет солнечных установок	8
1.2	<b>Практическое занятие 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ</b>	12
1.2.1	Солнечное теплоснабжение	12
1.2.2	Выбор схемы применения оборудования, пассивные и активные системы	12
1.2.3	Жидкостные отопительные системы	17
1.2.4	Воздушная отопительная система	19
1.2.5	Приблизительный расчет солнечного коллектора	20
	Контрольные вопросы	24
1.3	<b>Практическое занятие 3. Расчет ветроэлектростанции с горизонтальной осью колеса</b>	25
1.3.1	Краткие теоретические сведения	25
1.3.2	Методика расчёта	26
1.3.3	Задание для самостоятельного решения (контрольная работа №1)	28
1.4	<b>Практическое занятие 4. Расчёт биогазовой установки</b>	30
1.4.1	Краткие теоретические сведения	30
1.4.2	Методика расчёта	36
1.4.3	Справочные данные	39
1.4.4	Задание для самостоятельного решения (контрольная работа №2)	41
	Контрольные вопросы	42
1.5	<b>Практическое занятие 5. Расчёт аккумулятора тепла</b>	43
1.5.1	Теоретическая часть	43
1.5.2	<b>РАСЧЕТ И УСТРОЙСТВО ТЕПЛОАККУМУЛЯТОРА СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА</b>	53
1.6	<b>Практическое занятие 6. Переработка растительных отходов</b>	59
1.6.1	Простое сжигание древесных отходов	59
1.6.2	<b>ПИРОЛИЗ И ГАЗИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	65
1.6.3	<b>ГИДРОЛИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	70
1.6.4	<b>СПИРТОВАЯ ФЕРМЕНТАЦИЯ (БРОЖЕНИЕ)</b>	71
	Контрольные вопросы	73
1.7	<b>Практическое занятие 7. Системы геотермального отопления</b>	74
1.7.1	Открытые схемы геотермального теплоснабжения	74

		Лист
1.7.2	Закрытые системы геотермального теплоснабжения	75
1.7.2.1	Закрытые геотермальные системы, обеспечивающие только горячее водоснабжение	75
1.7.2.2	Закрытые геотермальные системы теплоснабжения, обеспечивающие отопление и горячее водоснабжение	77
1.7.2.3	Закрытые геотермальные системы теплоснабжения, обеспечивающие только отопление	78
1.7.3	Применение тепловых насосов	79
	Контрольные вопросы	81
1.8	ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ	81
	Контрольные вопросы	103
2	Контрольные работы	104
2.1	Контрольная работа №1	104
2.2	Контрольная работа №2	116
	Список рекомендуемой литературы	122