

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение
и возобновляемые источники энергии»

А. В. Новик
А. Г. Рекс
Н. Г. Хутская

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные
технологии и энергетический менеджмент»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2022

УДК 620.92(075.8)

ББК 31.15я7

Н73

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Энергосбережение, гидравлика и теплотехника» УО БГТУ
(зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *А. С. Дмитриченко*);
ведущий научный сотрудник лаборатории турбулентности Института
тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси,
канд. физ.-мат. наук, доцент *Ю. В. Жукова*

Новик, А. В.

Н73

Возобновляемые источники энергии : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / А. В. Новик, А. Г. Рекс, Н. Г. Хутская. – Минск : БНТУ, 2022. – 90 с.

ISBN 978-985-583-803-7.

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с учебным планом кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» по курсу «Возобновляемые источники энергии».

Рекомендовано методической комиссией ФТУГ для специальности «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент».

УДК 620.92(075.8)

ББК 31.15я7

ISBN 978-985-583-803-7

© Новик А. В., Рекс А. Г.,
Хутская Н. Г., 2022

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

1. ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Общие сведения

Солнце является основным источником энергии, обеспечивающим существование жизни на Земле. Вследствие реакций ядерного синтеза в активном ядре Солнца достигаются температуры до 10^7 К. При этом поверхность звезды имеет температуру около 6000 К. Электромагнитным излучением солнечная энергия передается в космическое пространство и достигает поверхности Земли. Вся поверхность Земли получает от Солнца мощность около $1,2 \cdot 10^{17}$ Вт. Это эквивалентно тому, что менее одного часа получения этой энергии достаточно, чтобы удовлетворить энергетические нужды всего населения земного шара в течение года. Максимальная плотность потока солнечного излучения, приходящего на Землю, составляет примерно 1 кВт/м^2 . Для населенных районов, в зависимости от места, времени суток и погоды, потоки солнечной энергии меняются от 3 до 30 МДж/м² в день.

В среднем для создания комфортных условий жизни требуется примерно 2 кВт энергетической мощности на человека или примерно 170 МДж энергии в день. Если принять эффективность преобразования солнечной энергии в удобную для потребления форму равной 10 %, а поток солнечной энергии – 17 МДж/м² в день, то требуемую для одного человека энергию можно получить со 100 м² площади земной поверхности. При средней плотности населения в городах 500 человек на 1 км² на одного человека приходится 2000 м² земной поверхности. Таким образом, достаточно всего 5 % этой площади, чтобы за счет снимаемой с нее солнечной энергии удовлетворить энергетические потребности человека.

Для характеристики солнечного излучения используются следующие основные величины:

1. *Поток излучения* – величина, равная энергии, переносимой электромагнитными волнами за одну секунду через произвольную поверхность. Единица измерения потока излучения – Дж/с = Вт.

2. *Плотность потока излучения (энергетическая освещенность)* – величина, равная отношению потока излучения к площади равномерно облучаемой им поверхности. Единица измерения плотности потока излучения – Вт/м².

3. Плотность потока излучения от Солнца, падающего на перпендикулярную ему площадку непосредственно за границей земной атмосферы, называется *солнечной постоянной* S , которая равна 1367 Вт/м^2 . Этот поток соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 5800 К .

4. Прибор для измерения энергетической освещенности называется *пиранометр*.

5. *Световым потоком* называется величина, определяемая потоком излучения и оцениваемая по его воздействию на человеческий глаз. Человеческий глаз неодинаково чувствителен к потокам света с различными длинами волн. Обычно при дневном освещении глаз наиболее чувствителен к свету с длиной волны 555 нм (зеленый цвет). Поэтому одинаковые по мощности потоки излучения, но разных длин волн, вызывают разные световые ощущения у человека. Единицей измерения светового потока с точки зрения восприятия его человеческим глазом (яркости) является *люмен* (лм).

По определению, принятому в системе СИ, для монохроматического излучения частотой $540 \cdot 10^{12}$ герц или длиной волны в воздухе 555 нм : $1 \text{ лм} = 1,46 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$, или $1 \text{ Вт} = 683 \text{ лм}$.

6. *Освещенность* – величина, равная отношению светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности (табл. 1.1). Освещенность измеряется в *люксах* (лк). $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$.

Для монохроматического излучения частотой $540 \cdot 10^{12}$ герц: $1 \text{ лк} = 1,46 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$, или $1 \text{ Вт/м}^2 = 683 \text{ лк}$.

Солнечная постоянная в люксах равна примерно $135\,000$. Таким образом, для солнечной постоянной $1 \text{ лк} = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$, или $1 \text{ Вт/м}^2 = 1000 \text{ лк}$.

7. Прибор, предназначенный для измерения освещенности, называется *люксметром*.

Таблица 1.1

Освещенность, создаваемая различными источниками

Источник	Освещенность, лк	Энергетическая освещенность, Вт/м^2
Солнечный свет в полдень (средние широты)	100 000	460

Окончание табл. 1.1

Источник	Освещенность, лк	Энергетическая освещенность, Вт/м ²
Солнечный свет зимой	10 000	46
Облачное небо летом	5000–20 000	23–92
Облачное небо зимой	1000–2000	4,6–9,2
Рассеянный свет в светлой комнате (вблизи окна)	100	0,46
Светильники, создающие необходимую для чтения освещенность	30–50	0,14–0,23
Полная Луна, облучающая поверхность Земли	0,2	$0,92 \cdot 10^{-3}$

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ – СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ

Цель работы: изучить принцип преобразования солнечной энергии в электрическую; исследовать основные характеристики солнечного модуля.

Общие сведения

В связи с большим потенциалом солнечной энергии заманчивым является максимально возможное использование ее для нужд людей. При этом самым оптимальным представляется прямое преобразование солнечной энергии в наиболее распространенную в использовании электрическую энергию.

Это становится возможным при помощи использования такого физического явления, как *фотоэффект*.

Фотоэффектом называются электрические явления, происходящие при освещении вещества светом: выход электронов из металлов (*фотоэлектрическая эмиссия*, или *внешний фотоэффект*), перемещение зарядов через границу раздела полупроводников с различными типами проводимости (*p-n*) (*вентильный фотоэффект*), изменение электрической проводимости (*фотопроводимость*).

На использовании вентильного фотоэффекта основаны фотоэлектрические преобразователи энергии – солнечные элементы.

Наиболее распространенным полупроводником, используемым для создания солнечных элементов, является *кремний*.

Солнечные элементы характеризуются *коэффициентом преобразования солнечной энергии в электрическую*, который представляет собой отношение максимальной электрической мощности, вырабатываемой элементом, к падающему потоку излучения. Типичные кремниевые солнечные элементы площадью 100 см² имеют коэффициент преобразования 10–15 % (т. е. при энергетической освещенности 1 кВт/м² вырабатывают электрическую мощность 1–1,5 Вт) при создаваемой разности потенциалов около 1 В.

Типичное строение солнечного элемента с *p-n*-переходом изображено на рис. 1.1.

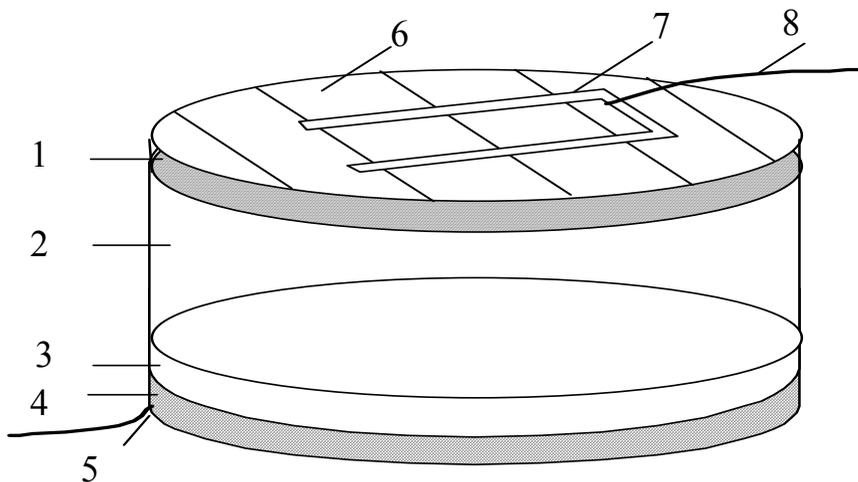


Рис. 1.1. Строение солнечного элемента:

- 1 – слой полупроводника (толщина 0,2–1,0 мкм) с *n*-проводимостью;
- 2 – слой полупроводника (толщина 250–400 мкм) с *p*-проводимостью;
- 3 – добавочный потенциальный барьер (толщина 0,2 мкм);
- 4 – металлический контакт с тыльной стороны; 5 – соединительный проводник с лицевой поверхностью предыдущего элемента;
- 6 – противотрагательное покрытие; 7 – лицевой контакт; 8 – соединительный проводник к тыльному контакту следующего элемента

Характерный поперечный размер солнечного элемента 10 см.

Солнечные элементы последовательно соединяются в солнечные модули, которые, в свою очередь, параллельно соединяются в солнечные батареи, как изображено на рис. 1.2.

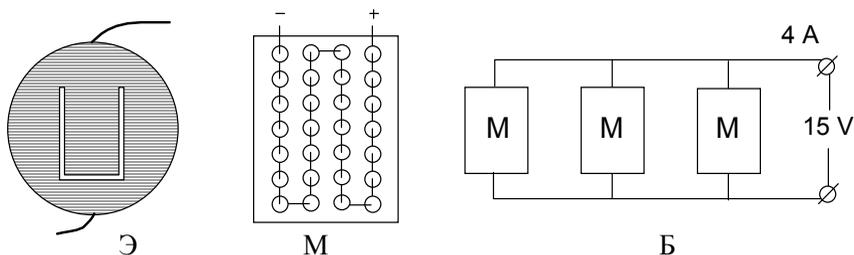


Рис. 1.2. Соединение солнечных элементов:

Э – солнечный элемент; М – солнечный модуль; Б – солнечная батарея

В 1958 г. впервые солнечные батареи были использованы в США для энергообеспечения искусственного спутника Земли Vanguard 1. В последующем они стали неотъемлемой частью космических аппаратов.

Широко известны микрокалькуляторы, часы, радиоприемники и многие другие электронные устройства, работающие на солнечных батареях.

Основные компоненты солнечной энергетической установки изображены на рис. 1.3.

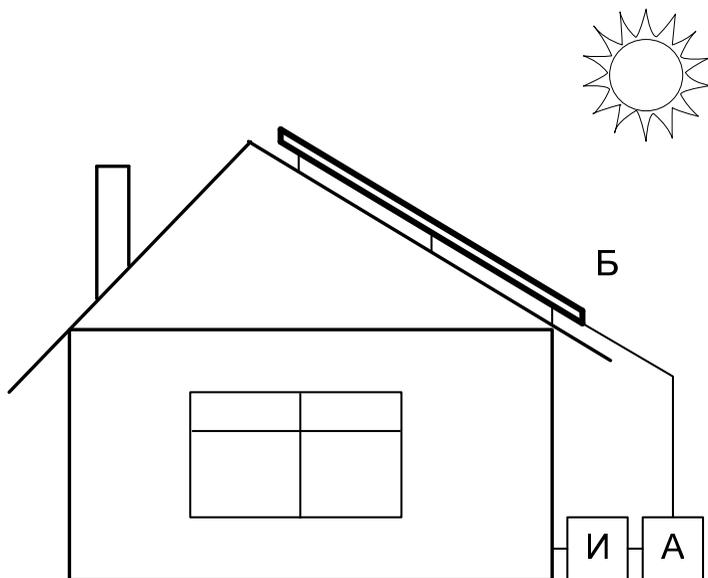


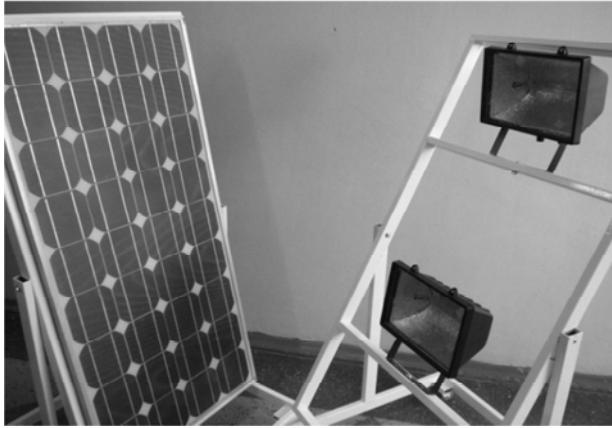
Рис. 1.3. Солнечная энергетическая установка:

Б – солнечная батарея с приборами контроля и управления;
А – аккумуляторная батарея; И – инвертор для преобразования постоянного тока солнечной батареи в переменный промышленного параметра, потребляемый большинством электрических устройств

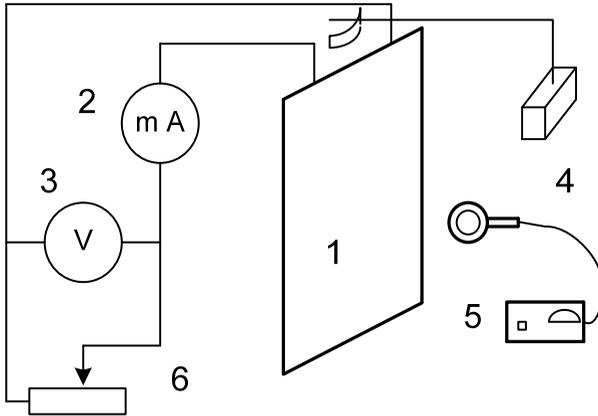
Несмотря на неравномерность суточного потока солнечного излучения и его отсутствие в ночное время, аккумуляторная батарея, путем накопления вырабатываемого солнечной батареей электричества, позволяет обеспечить непрерывную работу солнечной энергетической установки.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представлена на рис. 1.4.



a



б

Рис. 1.4. Внешний вид (*a*) и схема (*б*) экспериментальной установки:
1 – солнечный модуль; *2, 3* – амперметр и вольтметр для определения напряжения и силы тока, вырабатываемых солнечной батареей;
4 – источник света, имитирующий солнечное излучение – «солнечный имитатор»;
5 – пиранометр для определения энергетической освещенности поверхности солнечного модуля; *6* – блок нагрузок, позволяющий регулировать нагрузку в электрической цепи

Порядок выполнения работы

Задание 1. Исследовать ЭДС холостого хода солнечного модуля:

1. Удостовериться, что нагрузка на солнечный модуль отсутствует.
2. Установить «солнечный имитатор» на расстоянии примерно 1 м от панели солнечного модуля так, чтобы обеспечить наиболее равномерную его освещенность и включить в сеть.
3. С помощью пиранометра измерить энергетическую освещенность (плотность потока излучения) панели солнечного модуля $q_{\text{изл}}$, Вт/м².
4. По показаниям вольтметра определить ЭДС холостого хода, вырабатываемую солнечным модулем, при угле φ между нормалью к панели модуля и плоскости «солнечного имитатора», равным нулю. Это соответствует прямому падению излучения.
5. Поворачивая источник света, проделать аналогичные измерения при косом падении излучения на поверхность модуля.
6. Данные занести в табл. 1.2.
7. Построить график зависимости ЭДС солнечного модуля от косинуса угла падения излучения φ .

Таблица 1.2

Зависимость ЭДС холостого хода солнечного модуля от угла падения солнечного излучения

Измерение	φ	$\cos \varphi$	ЭДС, В	$q_{\text{изл}}$, Вт/м ²
1				
2				
3				

Задание 2. Исследовать зависимость ЭДС холостого хода солнечного модуля от энергетической освещенности:

1. Установить «солнечный имитатор» на прямое падение излучения на расстоянии L между ним и панелью солнечного модуля.
2. Измерить энергетическую освещенность (плотность потока излучения) панели солнечного модуля $q_{\text{изл}}$, Вт/м², и вырабатываемую им ЭДС.
3. Повторить предыдущие измерения для нескольких расстояний L .

4. Данные занести в табл. 1.3.

5. Построить график зависимости ЭДС солнечного модуля от энергетической освещенности.

Таблица 1.3

Зависимость ЭДС холостого хода солнечного модуля от энергетической освещенности

Измерение	L , см	$q_{\text{изл}}$, Вт/м ²	ЭДС, В
1			
2			
3			
4			

Задание 3. Определить вольтамперную характеристику и коэффициент преобразования солнечного модуля:

1. Подсоединить нагрузку к солнечному модулю.

2. Установить «солнечный имитатор» на расстоянии примерно 1 м от панели солнечного модуля на прямое падение излучения.

3. С помощью пиранометра измерить энергетическую освещенность панели солнечного модуля $q_{\text{изл}}$, Вт/м². Умножив ее на площадь модуля S , м², определить поток излучения:

$$\Phi_{\text{изл}} = q_{\text{изл}} S,$$

поступающий на него.

4. По показаниям вольтметра и амперметра измерить ток I , А, и напряжение U , В, и определить электрическую мощность

$$N = IU, \text{ Вт},$$

в сети.

5. Вычислить коэффициент преобразования солнечного модуля

$$\eta = N / \Phi_{\text{изл}}.$$

6. Изменить сопротивление нагрузки в цепи и выполнить измерения и вычисления, соответствующие пп. 4, 5.

7. Данные занести в табл. 1.4.

8. Построить вольтамперную характеристику $I(U)$ солнечного модуля при данной плотности потока излучения.

Таблица 1.4

Вольтамперная характеристика и коэффициент преобразования солнечного модуля

$q_{\text{изл}}, \text{Вт/м}^2$			$S, \text{м}^2$			$\Phi_{\text{изл}}, \text{Вт}$		
Измерение	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$N = IU, \text{Вт}$		$\eta = N / \Phi_{\text{изл}}$			
1								
2								
3								
4								

Применение солнечных батарей

7–8 июля 2010 года самолет на солнечных батареях SolarImpulse (прототип HB-SIA) совершил первый 26-часовой полет (рис. 1.5).

Масса самолета – 1600 кг.

Размах крыла – 63,40 м.

Площадь крыла – 200 м².

Силовая установка – 4 двигателя по 7,5 кВт.

Коэффициент преобразования солнечных батарей – 22,5 %.



Рис. 1.5. Прототип HB-SIA

Иные способы применения солнечных батарей представлены на рис. 1.6 и рис. 1.7.



Рис. 1.6. Фотоэлектрическая станция
вдоль обочины автотрассы

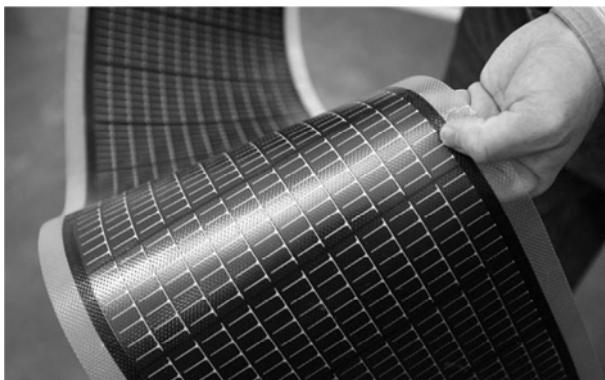


Рис. 1.7. Гибкие фотоэлектрические модули

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК ПРОМЫШЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Цель работы: изучение принципа последовательного преобразования солнечной энергии в электрическую энергию постоянного тока низкого напряжения и далее в электрическую энергию переменного тока высокого напряжения.

Общие сведения

Основная масса электрических машин работает от переменного электрического тока. Кроме того фотоэлектрическая станция может поставлять электроэнергию в существующую электроэнергетическую систему переменного тока. В связи с этим вырабатываемый фотоэлектрической батареей постоянный ток должен быть преобразован в переменный ток промышленных параметров. Для этих целей используются специальные устройства, называемые *инверторами*.

Инвертор – устройство для преобразования постоянного тока в переменный ток заданной частоты, в том числе, с изменением величины напряжения. Обычно представляет собой генератор периодического напряжения, по форме приближенный к синусоиде.

Существуют несколько групп инверторов, которые различаются по стоимости:

- первая группа – более дорогие инверторы, обеспечивающие синусоидальное выходное напряжение;
- вторая группа обеспечивает выходное напряжение упрощенной формы, заменяющей синусоиду.

Для подавляющего большинства бытовых приборов допустимо использовать переменное напряжение с упрощенной формой сигнала. Синусоида важна только для некоторых телекоммуникационных, измерительных, лабораторных приборов, медицинской аппаратуры, а также профессиональной аудиоаппаратуры. Выбор инвертора производится, исходя из пиковой мощности энергопотребления стандартного напряжения 220В/50Гц.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представлена на рис. 2.1.

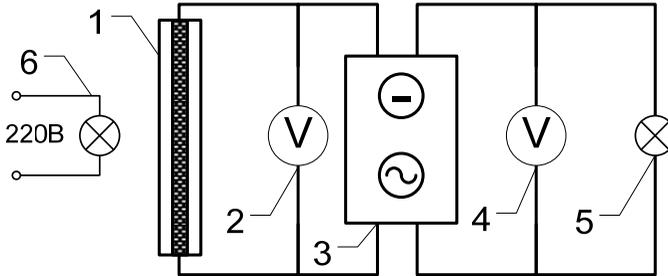


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки

- 1 – солнечный модуль; 2 – вольтметр постоянного тока низкого напряжения;
3 – инвертор; 4 – вольтметр для переменного тока высокого напряжения;
5 – нагрузка в виде неоновой лампочки; 6 – источник света,
имитирующий солнечное излучение; пиранометр для измерения
энергетической освещенности поверхности солнечного модуля
на схеме не показан

Порядок выполнения работы

1. Установить источник света – «солнечный имитатор» – на расстоянии L от плоскости солнечного модуля и включить его в сеть.
2. Измерить пиранометром энергетическую освещенность поверхности солнечного модуля $q_{\text{изл}}$, Вт/м², а также первичное постоянное напряжение U_1 и вторичное переменное напряжение после инвертора U_2 . Результаты измерений занести в табл. 2.1. При загорании неоновой лампочки HL отметить результаты измерения звездочкой «*».
3. Изменить расстояние между источником света и солнечным модулем.
4. Выполнить измерения и вычисления, соответствующие пп. 2 и 3 не менее 5 раз.
5. Выключить источник света.
6. Для каждого измерения определить коэффициент преобразования инвертора

$$K = U_2 / U_1.$$

7. Результаты расчетов занести в табл. 2.1.

8. Построить график зависимости U_2 от энергетической освещенности солнечного модуля $q_{\text{изл}}$. На графике показать напряжение зажигания неоновой лампочки HL .

9. Отметить при какой энергетической освещенности $q_{\text{изл}}$ наблюдается наибольшее значение коэффициента преобразования инвертора K .

Таблица 2.1

Характеристики инвертора

Измерение	$q_{\text{изл}}$, Вт/м ²	U_1 , В	U_2 , В	K
1				
2				
3				
4				
5				

2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ. ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Общие сведения

Основные характеристики солнечного излучения содержатся в настоящем сборнике в разделе 1 «Прямое преобразование солнечной энергии в электрическую».

Солнечный коллектор – это устройство для эффективного преобразования энергии солнечного излучения в тепловую энергию.

С физической точки зрения, такого рода преобразование связано со способностью атомов вещества поглощать электромагнитное излучение, за счет этого увеличивать свою кинетическую энергию и повышать температуру этого вещества. Это явление использовалось людьми в своих бытовых и производственных целях, например, для сушки разных изделий.

В настоящее время такое использование солнечной энергии наиболее широко применяется для нагрева воды в системах горячего водоснабжения, поэтому соответствующие устройства часто называют солнечными водоподогревателями и т. п. Затраты энергии на подогрев воды для бытовых нужд составляют в наших широтах до 20 % от среднегодового потребления энергии на душу населения. Подогрев воды для производственных нужд увеличивают эту долю почти вдвое. Между тем, современный опыт показывает, что солнечные коллекторы, даже в облачную погоду и при отрицательных внешних температурах, в значительной степени позволяют обеспечивать бытовые потребности людей в горячей воде.

Основными элементами солнечного коллектора являются:

- панель, принимающая солнечное излучение;
- система переноса теплоты теплоносителем;
- резервуар-накопитель нагретой воды.

Наиболее распространенными в настоящее время конструкциями солнечных коллекторов являются *плоские* и *вакуумные*.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Цель работы: изучение принципа работы плоского солнечного коллектора и определение его коэффициента преобразования.

Общие сведения

Общий вид плоского солнечного коллектора, установленного на крыше дома, изображен на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Внешний вид плоского солнечного коллектора

Приемная панель плоского коллектора представляет собой металлическую пластину, зачерненную с принимающей стороны для лучшего поглощения излучения. С противоположной стороны пластины организуется система циркуляции теплоносителя, осуществляющего перенос теплоты от пластины к воде в баке-накопителе.

С наружной стороны приемная панель закрыта стеклом, предотвращающим повреждение панели и обратный выход аккумулированной теплоты. Вся конструкция заключена в раму и хорошо теплоизолирована с тыльной стороны (рис. 3.2).

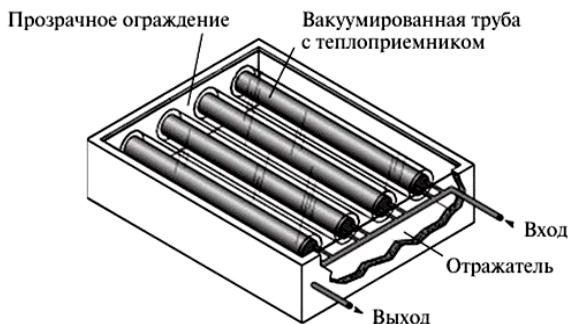


Рис 3.2 Схема плоского солнечного коллектора

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой действующий плоский солнечный коллектор, соответствующий изображенному на рис. 3.3. В баке-накопителе нагретой воды установлены термопары или термометры для измерения ее температуры. Солнечное излучение моделируется «солнечным имитатором», состоящим из системы мощных осветительных ламп, закрепленных на подвижной раме. Плотность потока излучения (энергетическая освещенность) определяется с помощью специального прибора – пиранометра, в соответствии с инструкцией по работе с ним.



Рис. 3.3. Плоский солнечный коллектор

Порядок выполнения работы

1. По показаниям термопар или термометра в баке-накопителе зафиксировать начальную среднюю температуру воды в нем T_0 .

2. Установить «солнечный имитатор» на расстоянии примерно 1 м от панели солнечного коллектора так, чтобы обеспечить максимальную освещенность, включить его в сеть и начать отсчет времени t .

3. С помощью пиранометра измерить энергетическую освещенность (плотность потока излучения) панели коллектора $q_{\text{изл}}$, Вт/м². Умножив ее на площадь коллектора S , м², определить поток излучения

$$\Phi_{\text{изл}} = q_{\text{изл}}S,$$

поступающий на коллектор.

4. Через каждые 5 минут снимать показания термопар или термометра и определять среднюю температуру воды в баке $T_{\text{ср}}$.

Обработка экспериментальных данных

1. Для каждого измерения средней температуры воды в баке вычислить количество полученной теплоты $Q_{\text{в}}$:

$$Q_{\text{в}} = C_p M (T_{\text{ср}} - T_0),$$

где $C_p = 4,19$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость воды;

M – масса воды в баке, кг.

2. После каждого измерения температуры воды в баке вычислять энергию излучения, поступившую на коллектор:

$$E_{\text{изл}} = \Phi_{\text{изл}}t,$$

где t – время, прошедшее с начала эксперимента, с.

3. Для каждого измерения средней температуры воды в баке вычислить коэффициент преобразования солнечного коллектора

$$\eta = Q_{\text{в}} / E_{\text{изл}}.$$

Занести данные измерений и вычислений в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Таблица измерений и вычислений

Измерение	t , с	$T_{\text{ср}}$, $^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{в}}$, кДж	$E_{\text{изл}}$, кДж	η	$q_{\text{изл}}$, Вт/м ²	S_2 , м ²	$\Phi_{\text{изл}}$, Вт
1								
2								
3								
4								

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОГО СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Цель работы: изучение принципа работы вакуумного солнечного коллектора; определение его основных характеристик.

Общие сведения

Так же, как и у плоского, основными элементами вакуумного солнечного коллектора являются панель, поглощающая солнечное излучение (абсорбер), и соединенный с ней трубами бак-накопитель горячей воды.

Внешний вид такого коллектора представлен на рис. 4.1, 4.2.



Рис. 4.1. Внешний вид вакуумного коллектора

Основной особенностью вакуумного солнечного коллектора является то, что абсорбер состоит из набора отдельных элементов. Каждый элемент представляет собой стеклянную колбу с двойными стенками, пространство между которыми вакуумировано. Это предот-

вращает передачу тепла теплопроводностью между стенками колбы. Такая колба фактически представляет собой сосуд Дьюара, который широко используется в бытовых термосах.



Рис. 4.2. Колбы вакуумного коллектора и их соединение между собой

Однако, в отличие от сосуда Дьюара, в термосах, где обе поверхности стеклянной колбы покрыты еще и светоотражающим веществом для предотвращения теплопередачи также и излучением, внешняя стенка колбы вакуумного солнечного коллектора является прозрачной, а внутренняя покрыта хорошо поглощающим солнечное излучение веществом. Таким образом, более 90 % энергии поглощенного солнечного излучения концентрируется в виде тепловой энергии во внутренней части колбы, которая хорошо теплоизолирована вакуумом от окружающей среды. В связи с этим вакуумные солнечные коллекторы обладают очень высоким коэффициентом преобразования энергии солнечного излучения в полезную теплоту.

Для передачи теплоты из внутреннего объема колбы к нагреваемой жидкости (воде) внутрь колб помещаются тепловые трубы (термосифоны), обладающие высокой теплопередающей способностью. Отличительной особенностью тепловых труб является то, что процесс переноса тепла в них осуществляется теплоносителем, претерпевающим обязательно фазовые превращения: парообразование (кипение) – конденсация.

Термосифон, принцип действия которого представлен на рис. 4.3, – герметичный цилиндрический сосуд, частично заполненный жидкостью.



Рис. 4.3. Принцип действия термосифона

К нижней его части (зоне испарения) подводится тепловой поток q , а от верхней части (зоны конденсации) – отводится. Таким образом, между верхней и нижней частями термосифона создается разность температур. Условия существования жидкости в термосифоне и ее свойства подбираются так, чтобы при температуре в зоне испарения жидкость кипела, а в зоне конденсации – конденсировалась.

Как известно температура кипения любой жидкости сильно зависит от давления газа над ее поверхностью. Поэтому такие условия могут быть созданы, например, для воды за счет понижения давления воздуха в трубке термосифона. При необходимости в качестве теплоносителя в термосифоне подбираются легкоиспаряющиеся жидкости, с более низкими температурами кипения.

Когда нижняя часть термосифона нагревается, это вызывает кипение и испарение жидкости. Образующийся пар поднимается вверх к более холодной части термосифона, где он отдает тепло и конденсируется. Конденсат под действием силы тяжести стекает по стенкам термосифона вниз и возвращается в его горячую часть. И так по непрерывному циклу тепло от нижней части термосифона передается в его верхнюю часть. Так как скрытая теплота парообразования велика, то даже при очень малой разности температур между концами термосифона он может передавать значительное количество теплоты.

Очевидно, что такой термосифон не может работать в горизонтальном положении. Для эффективной работы угол между осью и горизонтальным направлением должен составлять не менее 20° . Поскольку роль силы тяжести в таком термосифоне является определяющей, его также называют гравитационной тепловой трубой.

Полная схема отдельного элемента вакуумного коллектора изображена на рис. 4.4.

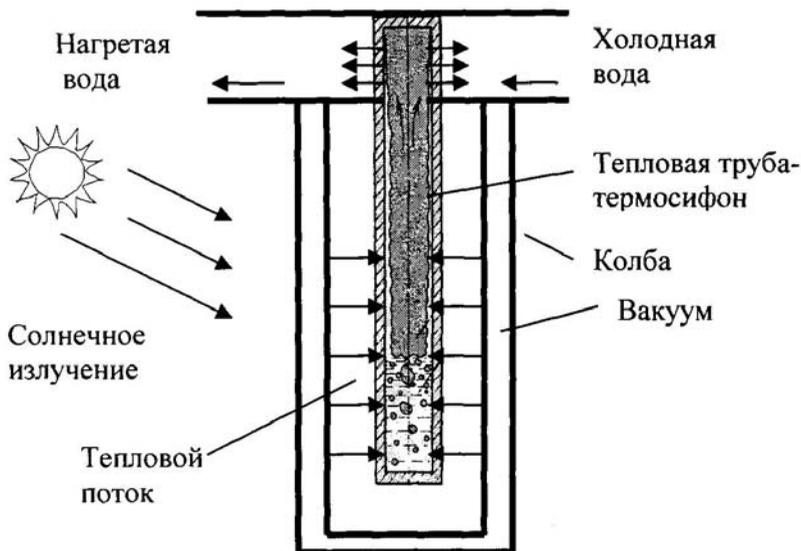


Рис. 4.4. Схема вакуумного солнечного коллектора

Использование данной схемы позволяет достичь большего коэффициента преобразования энергии солнечного излучения в полезную теплоту, по сравнению с плоскими коллекторами (особенно при работе в условиях низких температур и слабой освещенности).

Современные бытовые вакуумные солнечные коллекторы способны доводить воду до кипения даже при отрицательной окружающей температуре, сохраняя работоспособность в холодное время года, вплоть до -30°C .

Основным недостатком вакуумных коллекторов является их более высокая стоимость, по сравнению с плоскими, и более трудоемкая эксплуатация в зимних условиях.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой действующий вакуумный солнечный коллектор, соответствующий рис. 4.1, 4.2. В баке-накопителе нагретой воды установлены термопары или термометры для измерения ее температуры. Солнечное излучение моделируется «солнечным имитатором», состоящим из системы мощных осветительных ламп, закрепленных на подвижной раме. Плотность потока излучения (энергетическая освещенность) определяется с помощью специального прибора – пиранометра, в соответствии с инструкцией по работе с ним.

Порядок выполнения работы

1. По показаниям термопар или термометра в баке-накопителе зафиксировать начальную среднюю температуру воды T_0 .
2. Установить «солнечный имитатор» на расстоянии примерно 1 м от панели солнечного коллектора так, чтобы обеспечить максимальную освещенность; включить его в сеть и начать отсчет времени t .
3. С помощью пиранометра измерить энергетическую освещенность (плотность потока излучения) панели коллектора $q_{\text{изл}}$, Вт/м². Умножив ее на площадь коллектора S , м², определить поток излучения, поступающий на коллектор:

$$\Phi_{\text{изл}} = q_{\text{изл}}S.$$

4. Через каждые 5 минут снимать показания термопар или термометра и определять среднюю температуру воды в баке $T_{\text{ср}}$.

Обработка экспериментальных данных

1. Для каждого измерения средней температуры воды в баке вычислить количество теплоты $Q_{\text{в}}$, полученное водой:

$$Q_{\text{в}} = C_p M (T_{\text{ср}} - T_0),$$

где $C_p = 4,19$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость воды;
 M – масса воды в баке, кг.

2. При каждом измерении температуры воды в баке вычислить энергию излучения, поступившую на коллектор:

$$E_{\text{изл}} = \Phi_{\text{изл}} t,$$

где t – время, прошедшее с начала эксперимента в секундах.

3. Для каждого измерения средней температуры воды в баке вычислить коэффициент преобразования солнечного коллектора

$$\eta = Q_{\text{в}} / E_{\text{изл}}.$$

Занести данные измерений и вычислений в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Таблица измерений и вычислений

Измерение	t , с	$T_{\text{ср}}$, °С	$Q_{\text{в}}$, кДж	$E_{\text{изл}}$, кДж	η	$q_{\text{изл}}$, Вт/м ²	S , м ²	$\Phi_{\text{изл}}$, Вт
1								
2								
3								
4								

3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЕТРА В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Цель работы: изучение принципа преобразования энергии ветра в электрическую энергию; изучение устройства ветроколеса; определение коэффициента мощности ветроэнергетической установки.

Общие сведения

Ветер представляет собой движение воздушных масс земной атмосферы, вызванное перепадом температуры в атмосфере из-за неравномерного нагрева ее Солнцем. *Таким образом, используемая энергия ветра является преобразованной в механическую энергией Солнца.*

Устройства, преобразующие энергию ветра в полезную механическую, электрическую или тепловую, называются *ветроэнергетическими установками (ВЭУ), или ветроустановками.*

Энергия ветра в механических установках, например, на мельницах и в водяных насосах, используется уже несколько столетий. После скачка цен на нефть в 1973 г. интерес к таким установкам резко возрос. Большая часть существующих ветроустановок построена в конце 70-х – начале 80-х гг. на современном техническом уровне при широком использовании последних достижений аэродинамики, механики, микроэлектроники для контроля и управления ими.

При правильной организации использования ветроэнергетики такой дешевый и неиссякаемый источник энергии, как ветер, может удовлетворить большую часть потребностей в любой отрасли народного хозяйства. Установки, преобразующие энергию ветра в электрическую, тепловую и механическую, могут обеспечить:

- промышленное производство электрической энергии в единой электроэнергетической системе страны;
- автономное энергоснабжение различных локальных объектов (оросительные системы, механизмы животноводческих ферм, вентиляцию, устройства микроклимата и т. п.);

- горячее водоснабжение, отопление, энергообеспечение холодильных агрегатов;
- подъем воды для садовых участков, на пастбищах;
- откачку воды из систем вертикального и горизонтального дренажа и прочих систем.

По сравнению с другими видами источников энергии, ветроэнергетические установки имеют следующие преимущества:

- отсутствие затрат на добычу и транспортировку топлива;
- снижение более чем в 10 раз трудозатрат на сооружение ветроэнергетической установки, по сравнению со строительством тепловых или атомных станций;
- широкий технологический диапазон прямого использования энергии ветроустановок (автономность или совместная работа с централизованными сетями, совместимость с другими источниками возобновляемой энергетики);
- минимальные сроки ввода мощностей в эксплуатацию;
- улучшение экологической обстановки за счет снижения уровня загрязнения окружающей среды.

Принцип действия и классификация ВЭУ

В ветроэнергетических установках энергия ветра преобразуется в механическую энергию их рабочих органов. Первичным и основным рабочим органом ВЭУ, непосредственно принимающим на себя энергию ветра и, как правило, преобразующим ее в кинетическую энергию своего вращения, является *ветроколесо*.

Вращение ветроколеса под действием ветра обуславливается тем, что на любое тело, обтекаемое потоком газа со скоростью u_0 , действует сила F_p , которую можно разложить на две составляющие: 1 – вдоль скорости набегающего потока, называемую *силой лобового сопротивления* F_C ; 2 – в направлении, перпендикулярном скорости набегающего потока, называемую *подъемной силой* F_{Π} (рис. 5.1).

Величины этих сил зависят от формы тела, ориентации его в потоке газа и от скорости газа. Действием этих сил рабочий орган ветроустановки (ветроколесо) приводится во вращение.

Ветроустановки классифицируются по двум основным признакам геометрии ветроколеса и его положению относительно направления ветра. Если ось вращения ветроколеса параллельна воздуш-

ному потоку, то установка называется *горизонтально-осевой*. Если перпендикулярна – *вертикально-осевой*.

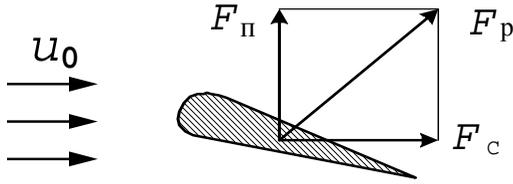


Рис. 5.1. Силы, действующие на тело, обтекаемое потоком газа

Каждое ветроколесо характеризуется:

– *ометаемой площадью* S ветроколеса называют площадь, покрываемую его лопастями при вращении в плоскости перпендикулярной направлению потока; для репеллерного ветроколеса (горизонтально осевого)

$$S = \pi D^2 / 4,$$

где D – диаметр ветроколеса, для ветроколеса Савониуса (вертикально осевого)

$$S = hb,$$

где h и b – высота ротора и его средний диаметр, соответственно;

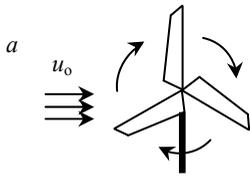
– *геометрическим заполнением*, равным отношению площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку, к ометаемой площади (например, при одинаковых лопастях четырехлопастное колесо имеет вдвое большее геометрическое заполнение, чем двухлопастное);

– *коэффициентом мощности* C_P , обозначающим эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока и зависящим от конструкции ветроколеса;

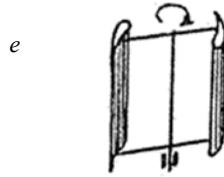
– *коэффициентом быстроходности* Z , представляющим собой отношение скорости конца лопасти к скорости ветра.

Ветроколесо с горизонтальной осью, использующее подъемную силу (двух- или трехлопастное ветроколесо), показано на рис. 5.2, *а, б, в, г*.

Ветроустановки, использующие силу лобового сопротивления, состоят из укрепленных вертикально на оси лопастей различной конфигурации рис. 5.2, *е, ж, з, и, л*.



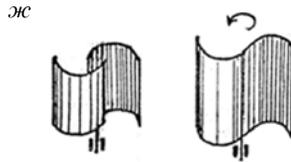
Репеллерное



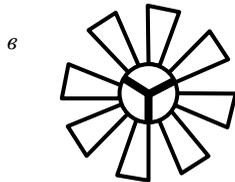
Ортогональное



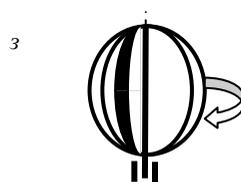
Репеллерное
с вихрепреобразователем



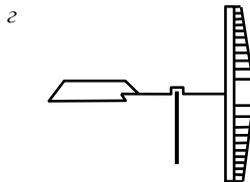
Савониус



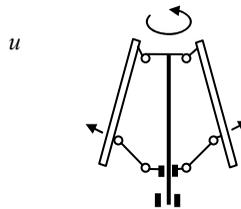
Многолопастное



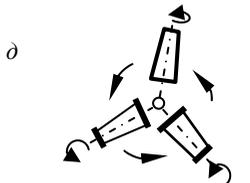
Дарье



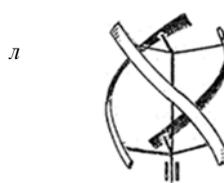
Парусное



Мак-гроув



Цилиндры Магнуса



Геликоидное

Рис. 5.2. Типы ветряных колес

На рис. 5.2, *д* представлено ветроколесо, использующее эффект Магнуса (эффект возникновения подъемной силы, перпендикулярной направлению ветра, при вращении цилиндра или конуса).

Установки, использующие силу лобового сопротивления, как правило, вращаются с линейной скоростью, меньшей скорости ветра. А установки, использующие подъемную силу, имеют линейную скорость концов лопастей, существенно, большую скорости ветра.

При скорости ветра u_0 и плотности воздуха ρ ветроколесо с ометаемой площадью S развивает мощность

$$N = C_N S \rho u_0^3 / 2 .$$

Из этой формулы видно, что мощность ветроколеса пропорциональна кубу скорости ветра.

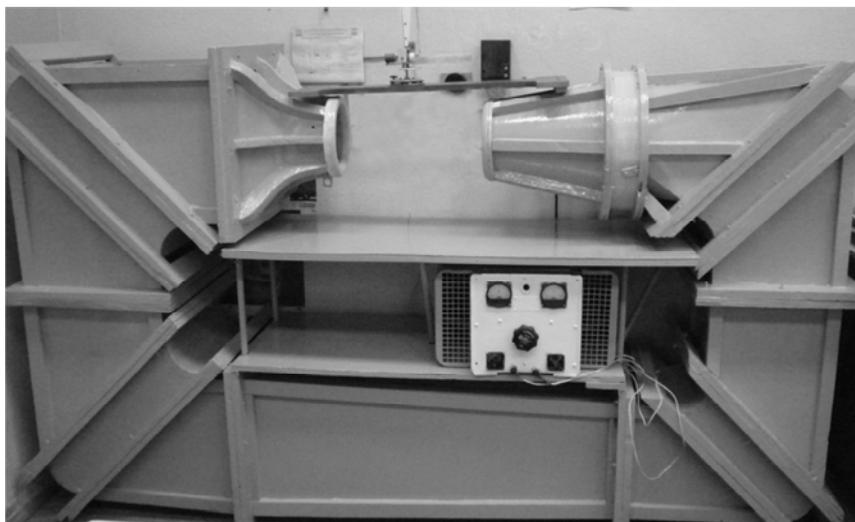
По теории Н. Жуковского, максимальное значение коэффициента мощности 0,6–0,69. На практике лучшие быстроходные колеса имеют $C_N \sim 0,45–0,48$; у тихоходных колес $C_N \sim 0,35–0,38$.

ВЭУ с большим геометрическим заполнением ветроколеса развивают значительную мощность при относительно слабом ветре, максимум мощности достигается при небольших оборотах колеса.

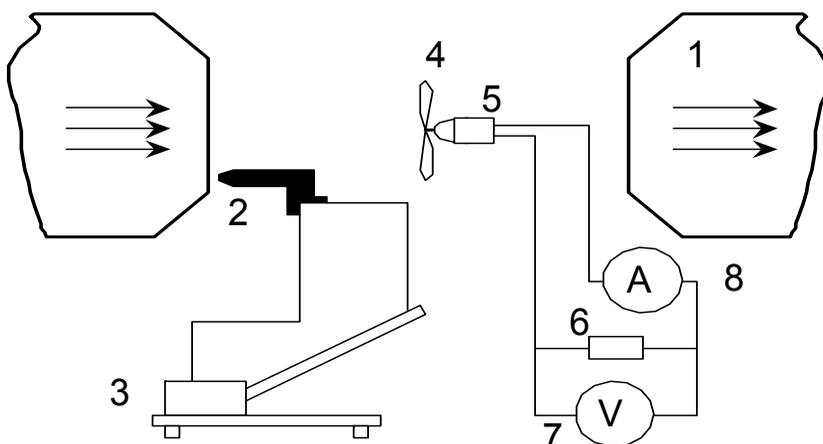
ВЭУ с малым заполнением достигают максимальной мощности при больших оборотах и дольше выходят на этот режим. Поэтому первые используются, например, в водяных насосах и даже при слабом ветре сохраняют работоспособность, а вторые – в качестве электрогенераторов, где требуется высокая частота вращения.

Экспериментальная установка

Работа выполняется на аэродинамической трубе *1* (рис. 5.3). В трубе воздушный поток создается осевым вентилятором (на рисунке не показан). Величина скорости потока в трубе регулируется изменением тока питания вентилятора. Скорость воздушного потока в рабочей области трубы определяется с помощью трубки Пито–Прандтля *2* и микроманометра *3*. В рабочую зону трубы установлено ветроколесо *4* с электрическим генератором *5*. К генератору подключена нагрузка *6*. В цепь нагрузки подключены также вольтметр *7* и амперметр *8*.



a



b

Рис. 5.3. Внешний вид аэродинамической трубы (*a*) и схема экспериментальной установки (*b*):
 1 – аэродинамическая труба; 2 – трубка Пито–Прандтля;
 3 – микроманометр; 4 – ветроколесо; 5 – электрический генератор;
 6 – нагрузка; 7 – вольтметр; 8 – амперметр

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с разными типами ветряных колес. По указанию преподавателя установить необходимый тип ветроколеса в рабочую зону аэродинамической трубы.

2. В отсутствие потока воздуха в трубе отметить начальное показание микроманометра l_0 .

3. Включить блок питания аэродинамической трубы. Установить необходимое значение скорости воздушного потока в рабочей зоне путем изменения тока питания вентилятора аэродинамической трубы.

4. Измерить значение скорости u_0 потока с помощью трубки Пито–Прандтля. Для этого необходимо снять показания микроманометра l . Данные записать в табл. 5.1.

5. Измерить напряжение U , создаваемое электрическим генератором, и ток I в нагрузке 6 .

6. Изменить величину скорости воздушного потока в аэродинамической трубе. Произвести для данного ветроколеса не менее 8 вышеуказанных измерений.

7. Заменить ветроколесо. Выполнить измерения, описанные в пп. 3–6.

Таблица 5.1

Характеристики ветроколес

Тип ветроколеса	№ опыта	Показания микроманометра		U_0 , м/с	Параметры генератора ветроустановки			C_N
		l_0 , мм	l , мм		U , В	I , А	N , Вт	

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислить скорость потока воздуха u_0 по формуле

$$u_0 = \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{в}}} K (l - l_0)},$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность спирта в микроманометре ($\rho_{\text{ж}} = 809,5 \text{ кг/м}^3$);
 $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха ($\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$);
 $(l - l_0)$ – разность показаний микроманометра, м;
 K – синус угла наклона трубки микроманометра (указан на микроманометре).

2. Вычислить электрическую мощность генератора $N = UI$.

3. Определить коэффициент мощности ветроколеса

$$C_N = 2N / (S\rho_{\text{в}}u_0^3).$$

4. Сравнить коэффициенты мощности различных типов ветроколес при разных скоростях воздушного потока и построить графики зависимости $C_N = f(u_0)$. Провести анализ полученных результатов.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ БИОМАССЫ

Одно из наиболее перспективных направлений деятельности, связанной с энергосбережением, поиском и разработкой альтернативных возобновляемых и экологически безопасных источников энергии – *биоэнергетика*. К ней относятся все способы промышленного получения энергии из биомассы различных видов: древесины, сельскохозяйственных и твердых бытовых отходов.

Из биомассы можно производить твердое, жидкое и газообразное биотопливо. Каждое из видов биотоплива имеет свои преимущества, недостатки и сферы применения. С точки зрения технологии сжигания и практического использования наибольший интерес представляют следующие характеристики биотоплива: химический состав, влажность, зольность, выход летучих.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ БИОТОПЛИВА

Цель работы: определение содержания аналитической влаги биотоплива.

Общие сведения

Биомасса состоит из органических твердых веществ растительного происхождения: кустарники, деревья, трава, торф. Все виды древесной биомассы, которые не могут быть использованы на предприятиях лесной промышленности, пригодны для производства энергии из древесины. Топливная древесина включает ветви, крону, тонкомерные деревья и другие виды низкосортной древесины или части деревьев, непригодные для промышленной переработки. В целом топливо из «лесной» древесины можно определить как топливо, состоящее из отходов, образующихся при промышленных рубках леса и рубках ухода. Кроме лесосечных отходов для производства биомассы используют отходы деревообрабатывающей промышленности: кора и опилки, утилизированная древесина, включая строительные отходы (древесные отходы, образующиеся при сносе зданий и сооружений или древесину тары) [2, 3].

Приблизительно половина массы свежесрубленного дерева состоит из воды (рис. 6.1). Вторая половина представляет собой сухое древесное вещество, содержащее 84–88 % летучих веществ, 11,4–15,6 % твердого углерода и 0,4–0,6 % золы (табл. 6.1, рис. 6.2). В безводной древесине общее содержание углеродного компонента составляет приблизительно 50 %. При сжигании древесины составляющие ее компоненты превращаются в водяной пар (H_2O), двуокись углерода (CO_2), окислы азота (NO_x), окись серы (SO_2) и золу. Древесина практически не содержит серы (максимум 0,05 %).

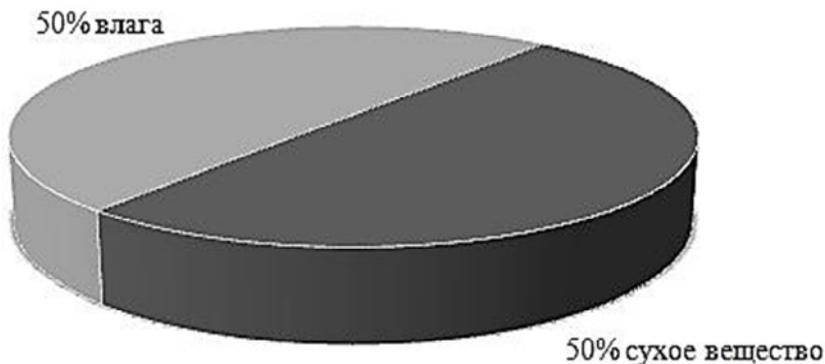


Рис. 6.1. Состав свежесрубленной древесины

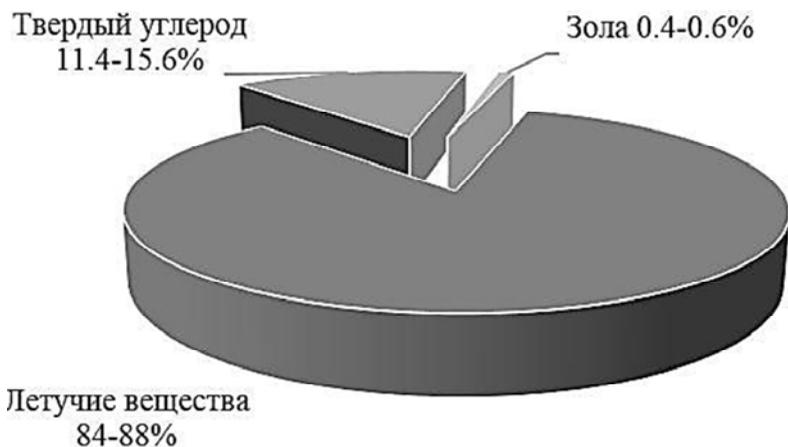


Рис. 6.2. Состав сухой древесины

Таблица 6.1

Элементарный состав сухой массы древесины [4]

Элемент	Древесина, %	Кора, %
С	48–50	51–66
Н	6,0–6,5	5,9–8,4
О	38–42	24,3–40,2
N	0,5–2,3	0,3–0,8
S	0,05	0,05
Cl	< 0,01	0,01 – 0,03

Влажность растущего дерева обычно 40–60 % и зависит от многих обстоятельств: места произрастания, климатических условий, вида дерева, времени года (во время роста выше, зимой – ниже). Влажность отдельных частей дерева также различна (табл. 6.2). При сушке из дерева выделяется, в первую очередь, так называемая свободная влага, затем связанная, или клеточная. При выпаривании клеточной влаги меняются физические свойства дерева. Сушка уменьшает объем дерева (усадка).

Таблица 6.2

Процент влажности рабочей массы W^p частей хвойных пород [4]

Сосна		Ель
Ствол	45–50	40–60
Ветки	50–56	42–46
Верхушка	60	60
Кора	36–67	38–63

Влажность оказывает значительное влияние на величину низшей теплоты сгорания, так как испарение требует некоторых затрат энергии (рис. 6.3).

Необработанные древесные топливные материалы часто имеют чрезвычайно разнородный гранулометрический состав частиц и различную влажность. Эти материалы содержат фракции различных размеров: от опилок, иголок, коры до деревянных палок и веток.

Влияние влажности на теплоту сгорания древесины

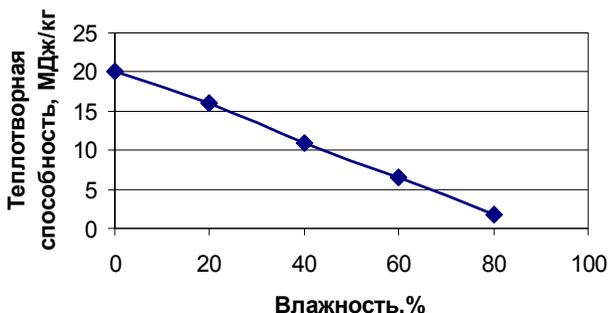


Рис. 6.3. Зависимость теплотворной способности древесины от ее влажности

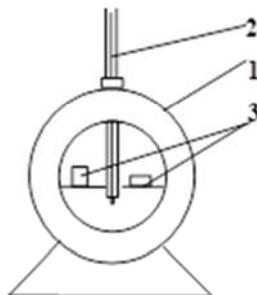
Высокая влажность и низкая объемная теплотворная способность делает невыгодным транспорт топлива даже на относительно небольшие расстояния, его складирование и хранение, привязывает производителей энергии к источникам топлива и в целом препятствует созданию глобального рынка биотоплива, подобного рынку ископаемого топлива.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представлена на рис. 6.4.



а



б

Рис. 6.4. Фотография (*а*) и схема (*б*) экспериментальной установки:
1 — сушильный шкаф; 2 — термометр; 3 — бюксы

Порядок выполнения работы

Определение содержания аналитической влаги (W^a) в аналитической пробе биотоплива. Пробу топлива перемешивают в открытой банке шпателем. С разной глубины, из двух-трех мест, перемещают в предварительно взвешенные бюксы навески топлива, равные 1 г. Определение содержания влаги производят параллельно в двух навесках.

Метод высушивания при температуре 105–110 °С

1. Бюксы с навесками топлива помещают в предварительно нагретый до 105–110 °С сушильный шкаф (рис. 6.4). Сушат при этой температуре торф, древесину – 40–50 мин.

2. Бюксы ставят открытыми, крышки кладут рядом.

3. После сушки бюксы с топливом вынимают из шкафа, закрывают крышками, охлаждают сначала на воздухе в течение 2–3 минут, затем в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивают.

4. Далее проводится контрольная сушка топлива в течение 15 минут при этом же температурном режиме. Контрольные сушки повторяются до тех пор, пока разность в весе при двух последовательных взвешиваниях будет менее 0,01 г.

5. Результаты вносятся в табл. 6.3.

Метод высушивания при температуре 140 ± 5 °С

1. Нагревают шкаф до температуры 160–165 °С. Бюксы с навесками топлива ставят на полку шкафа открытыми, крышки кладут рядом.

2. Высушивание проб производят при температуре 140 ± 5 °С. Отсчет времени начинают с момента достижения температуры в условленных пределах. При этой температуре высушивают навески торфа, древесины, растительной биомассы – 20 минут.

3. Результаты вносятся в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты измерений

№ бюкса	Навеска топлива G , г	Масса пустого бюкса G_1 , г	Масса бюкса с навеской топлива G_2 , г	Масса после первого просушивания G_3 , г	Масса после второго просушивания G_4 , г

Обработка экспериментальных данных

Содержание влаги в аналитической пробе топлива W^a в процентах определяют по формуле

$$W^a = \frac{G_2 - G_4}{G} 100 \%. \quad (6.1)$$

Определяют влагу для каждой из двух навесок топлива W_1^a и W_2^a , а затем находят среднее значение $W_{\text{ср}}^a$:

$$W_{\text{ср}}^a = \frac{W_1^a + W_2^a}{2}, \%. \quad (6.2)$$

Допускаемое расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 0,3 %.

Полученные результаты вносят в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Влага аналитической пробы испытуемого топлива

W_1^a	W_2^a	$W_{\text{ср}}^a$

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛЬНОСТИ БИОТОПЛИВА

Цель работы: определение зольности испытуемой пробы биотоплива.

Общие сведения

Негорючие минеральные примеси являются балластом. Они уменьшают содержание горючей массы в рабочем топливе. Вследствие этого уменьшается теплота сгорания топлива, увеличивается его расход, возрастают затраты на его транспортировку, усложняется процесс сжигания и снижается экономичность парогенераторной установки.

Зольность выражается в весовых процентах от сухой основы.

В табл. 7.1 и 7.2 приведены зольность и состав некоторых видов биомассы [3].

Таблица 7.1

Зольность различных видов древесного топлива

Древесное топливо	Зольность, %
Сосна желтая	0,3
Сосновые опилки	0,08
Сосновая кора	1,72
Еловая кора	2,34
Береза при получении	0,2
Смесь береза+клен	0,4
Пихта, смесь	2,2
Береза	0,6
Клен	1,4
Листва клена	0,6
Ивовые вершины	2,3
Ивовая щепа	1,6
Ива	1,2
Эвкалипт (разные виды)	0,4–1,1
Дуб	0,5–1,5
Дуб, щепа из целых деревьев	2,8
Дуб красный болотный	0,8
Кора дуба	5,3

Наряду с древесным топливом в котельных используется солома (второе по значимости топливо из группы биотоплив) и сено (табл. 7.2). Оба топлива – продукты аграрной деятельности.

Таблица 7.2

Элементарный состав сухой соломы [4]

Элемент	Диапазон, %	Среднее значение, %
<i>C</i>	45–47	46
<i>H</i>	5,8–6,0	5,9
<i>N</i>	0,4–0,6	0,5
<i>O</i>	39–41	40
<i>S</i>	0,01–0,13	0,08
<i>Cl</i>	0,14–0,97	0,31

Свойства соломы сильно зависят от места произрастания, времени года и погоды, почвы и удобрения. Например, содержание хлора в рано убранной соломе почти в 4 раза выше, чем в поздней.

Максимальное содержание хлора может достигать 0,97 %, и это сильно влияет на коррозию поверхностей нагрева.

Зольность соломы выше, чем у древесных топлив, в сухой части она составляет 4,5–6,5 %. В то же время температура плавления золы соломы может быть значительно ниже, чем у золы древесных топлив.

Размягчение золы ржи, овса и ячменя начинается при очень низких температурах (735–840 °С), что необходимо учитывать при выборе технологии сжигания и наладке режима горения в топке (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Зольность и теплота сгорания соломы различных зерновых [4]

Зерновая культура	Зольность на сухую массу A^C , %	Низшая теплота сгорания сухой массы $Q_{Н}^C$, МДж/кг	Низшая теплота сгорания рабочей массы при влажности 20 % $Q_{Н}^P$, МДж/кг
Рожь	4,5	17,0	13,6
Пшеница	6,5	17,8	13,8
Ячмень	4,5–5,88	17,4	13,4

Зерновая культура	Зольность на сухую массу A^C , %	Низшая теплота сгорания сухой массы $Q_{Н}^C$, МДж/кг	Низшая теплота сгорания рабочей массы при влажности 20 % $Q_{Н}^P$, МДж/кг
Овес	4,9	16,7	12,9
Солома в среднем	5,0	17,4	13,5

При изъятии биомассы из лесной экосистемы вместе с ней изымаются содержащиеся в ней питательные вещества. Содержание питательных веществ в вершинах и ветвях, частях дерева, которые используются в качестве топлива, выше, чем в стволовой древесине. Важную роль в развитии долговременного промышленного потенциала леса играет поддержание баланса между минеральными веществами, такими как кальций (Ca), калий (K), магний (Mg) и т. д. (табл. 7.4).

Таблица 7.4

Зольность и состав некоторых видов древесины

Древесное топливо	Зольность, %	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	MgO	N_2O	K_2O	SO_3	Другие
Береза	0,3	0,9	–	–	3,5	45,8	11,6	8,7	15,1	2,6	11,8
Сосна	0,2	3,5	–	–	2,7	41,8	16,1	3,1	15,3	4,5	13,0
Ель	0,3	1,0	–	–	2,7	36,8	9,8	3,2	29,6	4,3	12,6
Ива	1,7	0,09	0,06	–	9,9	33,3	5,1		0,21	2,4	48,9
Эвкалипт	0,4	0,6	0,2	0,3	5,9	35,1	10,4	2,3	13,6	1,9	29,7
Кора:											
– береза;	1,6	3,0	–	1,0	3,0	60,3	5,9	0,7	4,1	–	22,0
– сосна;	1,8	14,5	–	3,8	2,7	40,0	5,1	2,1	3,4	–	28,4
– ель;	3,4	21,7	–	1,8	2,7	50,5	4,2	2,8	3,5	–	12,8
– дуб	1,5	11,1	0,1	3,3	–	64,5	1,2	8,9	0,2	–	10,7

При сжигании биомассы большая часть питательных веществ (кроме азота) переходит в золу. Утилизация золы компенсирует потери питательных веществ, вызванные заготовкой древесной биомассы.

Зола содержит различное количество тяжелых металлов (табл. 7.5). Однако при утилизации ее в экосистему не поступают какие-либо «внешние или дополнительные» тяжелые металлы. Содержание тяжелых металлов в древесине значительно ниже, чем, например, в угле или торфе.

Таблица 7.5

Среднее содержание тяжелых металлов
в различных топливах, мг/кг

Тяжелый металл	Уголь	Торф	Древесина
Мышьяк (<i>As</i>)	150	100	5
Кадмий (<i>Cd</i>)	10	10	10
Кобальт (<i>Co</i>)	150	100	10
Хром (<i>Cr</i>)	400	250	50
Медь (<i>Cu</i>)	500	500	100
Ртуть (<i>Hg</i>)	4	5	1
Марганец (<i>Mn</i>)	2000	4500	5000
Никель (<i>Ni</i>)	400	300	50
Свинец (<i>Pb</i>)	500	250	200
Ванадий (<i>Vn</i>)	900	450	100
Цинк (<i>Zn</i>)	1000	900	1200

Древесная зола является щелочным веществом и может использоваться подобно извести для снижения кислотности почвы. Степень воздействия одной тонны золы соответствует степени воздействия 150–450 кг кальция.

Подводя итог всему вышесказанному, твердый негорючий остаток, получающийся после всех преобразований минеральной части в процессе горения топлива, называется *золой*. Состав и масса золы не идентичны составу и массе минеральных примесей топлива.

Важным свойством золы является ее *плавкость*. В зависимости от величины температуры плавления различают тугоплавкую золу (с температурой начала жидкоплавкого состояния выше 1425 °С), среднеплавкую (1200–1425 °С), легкоплавкую (ниже 1200 °С).

Отдельные компоненты золы имеют различные температуры плавления (от 800 до 2800 °С). Различные минеральные составляющие золы, расплавляясь, образуют смеси, имеющие более низкие температуры плавления, чем входящие в них вещества.

Зола, прошедшая стадию разложения и плавления и превратившаяся в спекшуюся или сплавленную массу, называется *шлаком*. В отличие от золы, которая в основном состоит из свободных окислов различных элементов, в шлаке эти окислы образуют сложные многокомпонентные системы.

Приведенная зольность топлива – это зольность, отнесенная к 4190 кДж (1000 ккал) его низшей теплоты сгорания.

$$A^{\text{п}} = 4190 \frac{A^{\text{р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \text{ кг \% } 10^{-3} / \text{кДж}. \quad (7.1)$$

Топлива с приведенной зольностью $A^{\text{п}} \leq 4$ считаются малозольными. В табл. 7.6 приведено содержание золы в различных топливах.

Таблица 7.6

Содержание золы в различных топливах

Топливо	Зольность на сухую массу, $A^{\text{с}}$, %	Приведенная зольность, $A^{\text{п}}$
Древесное топливо	0,5–1	0,3–0,5
Торф	10–15	2–3

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представлена на рис. 7.1, 7.2.



Рис. 7.1 Внешний вид экспериментальной установки:
1 – муфельная печь; 2 – лодочки; 3 – пластинка керамическая

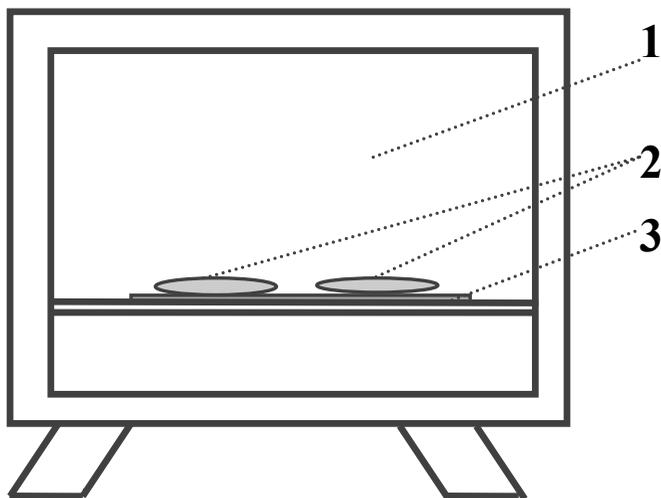


Рис. 7.2. Схема экспериментальной установки:
1 – муфельная печь; 2 – лодочки; 3 – пластинка керамическая

Порядок выполнения работы

1. Аналитическую пробу топлива перемешивают шпателем в открытой банке. На разной глубине, из двух-трех мест, ложечкой накладывают навески топлива по 1 грамму в предварительно взвешенные лодочки. Навески в лодочках размещают равномерным слоем. Определение зольности производится параллельно в двух навесках.

2. Муфельную печь нагревают до температуры 850–875 °С. Затем открывают дверцу муфеля и пластинку с лодочками устанавливают в нижней части. В таком положении пластинку выдерживают 3 минуты.

3. Затем пластинку с лодочками продвигают в муфель со скоростью 2 см в минуту. Закрывают дверцу муфеля и прокаливают навески при температуре 800–825 °С с продолжительностью 15 минут каждое до тех пор, пока разность в весе при двух последних взвешиваниях будет менее 0,001 г. Все взвешивания производят с точностью до 0,0002 г.

4. Результат взвешивания заносят в табл. 7.7.

Результаты взвешивания

№ лодочки	Навеска топлива, G , г	Масса лодочки, г			
		пустой G_1	с навеской топлива G_2	с золой после прокаливания G_3	с золой после контрольного прокаливания G_4

Обработка экспериментальных данных

Зольность аналитической пробы твердого топлива A^a в процентах вычисляют по формуле

$$A^a = \frac{G_4 - G_1}{G} 100 \%. \quad (7.2)$$

Определяется зольность каждой из двух навесок топлива (A_1^a и A_2^a), а затем – среднее значение зольности:

$$A_{\text{cp}}^a = \frac{A_1^a + A_2^a}{2}. \quad (7.3)$$

Допускаемые расхождения между результатами двух параллельных определений зольности одной аналитической пробы не должны превышать:

- 0,2 % – для топлива с зольностью до 12 %;
- 0,3 % – для топлива с зольностью от 12 до 25 %;
- 0,5 % – для топлива с зольностью более 25 %.

Зольность топлива на сухую массу вычисляют по формуле

$$A^c = A_{\text{cp}}^a \frac{100}{100 - W^a}, \quad (7.4)$$

где W^a – содержание аналитической влаги испытуемой пробы, %.

Зольность рабочего топлива вычисляют по формуле

$$A^p = A_{\text{ср}}^a \frac{100 - W^p}{100 - W^a}, \quad (7.5)$$

где W^p – содержание влаги в рабочем топливе по испытуемой пробе.

Приведенная зольность топлива $A^п$ определяется по формуле (7.1) при заданной теплотворной способности топлива.

Все данные заносятся в табл. 7.8.

Таблица 7.8

Зольность испытуемой пробы

A_1^a	A_2^a	$A_{\text{ср}}^a$	A^c	A^p	$A^п$

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ БИОТОПЛИВА

Цель работы: определение выхода летучих для различных биотоплив.

Общие сведения

Основными компонентами клеток древесины являются целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин (межклеточное вещество), которые составляют 99 % массы древесного материала. Длинные цепи углеводов образуют целлюлозу и гемицеллюлозу, лигнин является осложненным компонентом полимерных фенольных смол. Лигнин тесно связан с гемицеллюлозой, он действует как склеивающий агент, соединяя пучки цепей целлюлозы и растительные ткани, он придает растениям механическую прочность. Он богат углеродом и водородом: основными элементами производства теплоты. Поэтому лигнин обладает более высокой теплотворной способностью, по сравнению с углеводородами. Древесина и кора содержат экстрактивные вещества: терпены, жиры и фенолы.

При нагревании твердого топлива, без доступа воздуха, под действием высокой температуры (200–800 °С) начинается термическое разложение его на газообразную часть (летучие вещества) и твердый остаток (кокс). Наиболее нестойкими при повышении температуры являются сложные углеводороды и в том числе те, в состав которых входит кислород. Температура начала выхода летучих веществ при подогреве топлива, количество и состав газообразных продуктов разложения зависят от химического состава топлива. Чем меньше степень углефикации топлива, тем больше оно содержит термически неустойчивых молекул и, следовательно, больше выделяет летучих веществ. Выход летучих веществ из древесины начинается при температуре 200 °С, и скорость выхода увеличивается с повышением температуры. Сначала происходит разложение гемицеллюлозы и затем, при более высокой температуре, разложение целлюлозы. При температуре 400 °С, когда произошло полное выделение большинства летучих веществ, скорость выхода летучих

компонентов резко возрастает. Однако при температуре 400–500 °С может наблюдаться снижение скорости выхода летучих, связанное с процессом разложением лигнина, происходящим в пределах всего температурного диапазона, но наиболее активно – при высоких температурах.

Как правило, по сравнению с ископаемым углем, биомасса характеризуется высоким содержанием летучих компонентов и малым содержанием кокса, образующихся при сжигании топлива, что делает биомассу топливом с высокой реакционной способностью. Однако различные виды топливной биомассы имеют различное содержание летучих компонентов, что оказывает влияние на характеристики топлива, зависящие от химической структуры и связей, это определяет значительные различия зависимости выхода летучих от температуры.

Схема сжигания биомассы представлена на рис. 8.1.

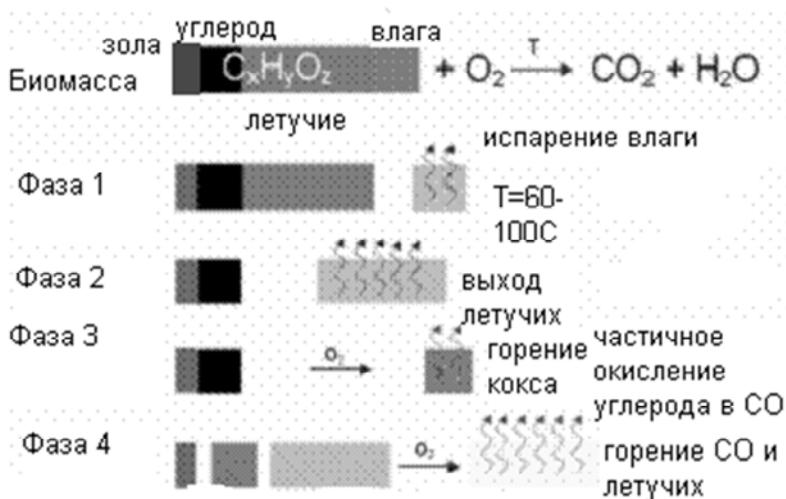


Рис. 8.1. Схема сжигания биомассы

В сухой древесине содержится около 85 % летучих веществ. В безводной древесине общее количество углеродного компонента составляет приблизительно 50 % (35,5 % переходит в летучие вещества, 14,5 % – это твердый углерод). Содержание летучих в соломе колеблется от 60 % до 70 %, что чуть ниже, чем в древесных топли-

вах (табл. 8.1). При сжигании древесины составляющие ее компоненты превращаются в двуокись и окись углерода CO_2 и CO , в водяной пар H_2O , окислы азота NO_x , окислы серы SO_2 (древесина практически не содержит серы, максимальное содержание составляет 0,05 %) (табл. 8.2).

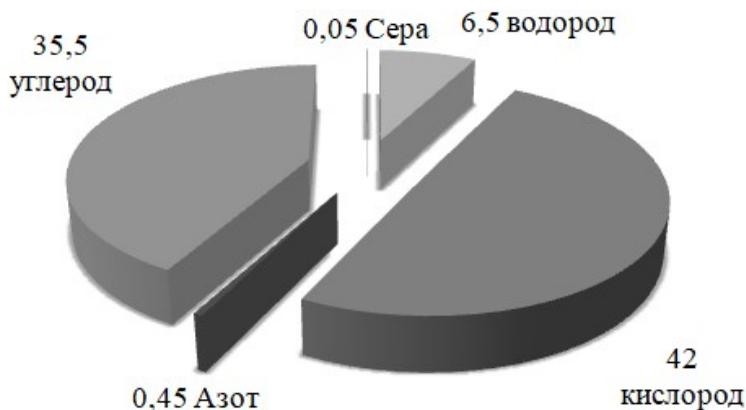


Рис. 8.2. Состав сухого вещества древесины, переходящего в летучие

Таблица 8.1

Выход летучих различных древесных топлив [3]

Древесное топливо	Летучие вещества, %
Сосна желтая	82,53
Сосновые опилки	83,1
Сосновая кора	73
Еловая кора	75,2
Береза при получении	89,9
Смесь береза + клен	84
Листва клена	87,9
Ивовые вершины	79,7
Ивовая щепа	80,8
Эвкалипт (разные виды)	81,6
Дуб	81,3–88,2
Дуб, щепа из целых деревьев	80,5
Дуб красный, опилки	86,2

Из-за большого количества летучих веществ, содержащихся в древесине, при ее горении образуются высокие языки пламени. Поэтому для сгорания требуется значительное пространство.

По сравнению с древесиной, торф содержит меньшее количество летучих веществ, но образует больше золы.

Количество летучих веществ, выделяемых топливом при нагревании, зависит от того, до какой температуры и в течение какого времени производится нагрев топлива. Выход летучих в лабораторных условиях определяют путем прогрева, без доступа воздуха, навески аналитической пробы топлива при температуре 850 ± 25 °С в течение 7 минут (при этом полного выделения летучих не достигается). Получившаяся потеря массы пробы топлива – *выход летучих веществ*, который выражают обычно на горючую массу топлива V^r .

Летучие вещества состоят из горючих соединений – углеводов, окиси углерода, водорода – и негорючих газов – углекислого газа и водяных паров. Так как для разных топлив количество отдельных компонентов в составе летучих веществ различно, то теплота сгорания последних неодинакова. Чем больше степень углефикации топлива, тем выше теплота сгорания летучих веществ.

Свойства твердого горючего (коксового) остатка топлива, образующегося после выхода горючих веществ, зависят от состава органических соединений, входящих в его горючую массу. Торф, бурые угли дают порошкообразный твердый горючий остаток.

Свойства кокса древесины:

– пористость (доля пустот в объеме частицы) 90 % (кокс угля 70 %);
– внутренняя удельная поверхность пор 10 000 м²/г; активированные угли – 1500 м²/г; кокс гранул – 250–550 м²/г; кокс автопокрышек – 700 м²/г; кокс угля – 100 м²/г.

Характер твердого горючего остатка играет решающую роль при определении наиболее рационального пути использования топлива.

Общее тепловыделение при сгорании топлива складывается из теплоты сгорания летучих веществ и коксового остатка. При сгорании топлива с малым выходом летучих веществ основное количество теплоты выделяется при горении коксовой частицы.

У топлива с большим выходом летучих веществ коксовый остаток получается пористым, что придает ему высокую реакционную

способность, т. е. способность легко вступать в реакцию с кислородом и восстанавливать CO_2 в CO .



Рис. 8.3. Кокс древесины

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представлена на рис. 8.4.



Рис. 8.4. Муфельная печь и весы:
1 – муфельная печь; 2 – лодочки; 3 – пластинка керамическая

Порядок выполнения работы

1. Аналитическую пробу топлива перемешивают в открытой банке шпателем или ложечкой. На разной глубине, из двух-трех мест, накладывают в предварительно взвешенные тигли с крышками навески топлива, равные 1 г.

2. Тигли с навесками плотно закрывают крышками и устанавливают на подставку, которая необходима для равномерного обогрева тиглей в печи.

3. Затем тигли с подставкой быстро помещают в разогретую до 860 °С муфельную печь. Дверцу печи закрывают и тигли выдерживают при температуре 850 ± 10 °С в течение 7 минут.

4. После тигли вынимают из печи, охлаждают сначала на воздухе, не снимая крышек, затем взвешивают.

Для повышения точности и надежности результатов анализа параллельно испытываются две навески топлива. Результаты взвешивания заносятся в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Результаты измерений

№ тигля	Навеска топлива G , г	Масса тигля, г		
		пустого G_1	с навеской топлива G_2	после выхода летучих G_3

Обработка экспериментальных данных

Выход летучих в аналитической пробе топлива V^a вычисляют в процентах:

$$V^a = \frac{(G_2 - G_3)100\%}{G} - W^a, \quad (8.1)$$

где W^a – содержание влаги в испытываемой аналитической пробе, %.

Определяют выход летучих для каждой из двух параллельных навесок топлива (V_1^a и V_2^a), затем находят среднее значение

$$V_{\text{cp}}^a = \frac{V_1^a + V_2^a}{2}. \quad (8.2)$$

Расхождение между результатами двух параллельных определений выхода летучих веществ по одной аналитической пробе (V_1^a и V_2^a) не должно превышать:

- для топлива с выходом летучих веществ менее 9 % – 0,3 %;
- для топлива с выходом летучих веществ от 9 до 45 % – 0,5 %;
- для топлива с выходом летучих веществ 45 % и выше – 1,0 %

Выход летучих веществ на условную горючую массу V^Γ вычисляют в %:

$$V^\Gamma = V_{\text{cp}}^a \frac{100}{100 - W^a - A^a}, \quad (8.3),$$

где W^a , A^a – влажность и зольность испытуемой аналитической пробы топлива, %.

Результаты вычислений заносятся в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Выход летучих

V_1^a	V_2^a	V_{cp}^a	V^Γ

В программе обработки данных «Z-лаб»:

I колонка. 2 пика – 1-й: все компоненты; 2-й: CO.

II колонка. Последовательно пики – H_2 , O_2 , CH_4 и CO (если есть).

На поле диаграммы щелкнуть левой кнопкой мыши. После чего появятся стрелки, ими можно масштабировать диаграмму. Shift – сдвиг.

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОЙ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ

Общие сведения

Потенциал теплоты определяется температурой теплоносителя, обладающего этой теплотой. Чем выше эта температура, тем выше потенциал теплоты.

Современные энергопреобразующие машины (турбины, двигатели внутреннего сгорания и т. п.) способны эффективно преобразовывать в другие виды энергии (механическую, электрическую) только теплоту с высоким потенциалом (несколько сотен градусов). Даже простые системы горячего водоснабжения требуют температуру воды не менее 50 °С.

С другой стороны в окружающей нас среде имеются неисчерпаемые возобновляемые источники теплоты с гораздо более низким потенциалом, которые тоже могут быть использованы в полезных целях. К таким природным источникам относятся приповерхностные слои Земли, водоемы (моря, озера, реки), воздух, а также бытовые тепловые отходы в системах водоотведения и водоочистки (рис. 8.1).



Рис. 8.1. Источники низкопотенциальной теплоты (грунт, вода, воздух)

При этом использование теплоты этих источников может осуществляться как без, так и с повышением ее потенциала.

В первом случае, например, в зимнее время года при передаче теплоты без повышения ее потенциала с глубинных (несколько метров) слоев Земли с положительной температурой на ее поверхность с отрицательной температурой можно обеспечить не замерзание отдельных участков этой поверхности. Для этих целей могут быть использованы *тепловые трубы*.

Во втором случае использование этой теплоты может осуществляться с повышением ее потенциала вплоть до промышленных показателей. Для этих целей могут быть использованы *тепловые насосы*.

Лабораторная работа № 9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОЙ НИЗКОПЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Цель работы: изучение принципа действия и характеристик тепловых труб и способов использования природной низкопотенциальной теплоты с их помощью.

Общие сведения

Тепловые трубы это устройства, обладающие на сегодняшний день наиболее высокими теплопередающими способностями.

Как известно процесс переноса теплоты осуществляется тремя механизмами: теплопроводностью (молекулярный перенос в веществе), конвекцией (движением масс вещества) и электромагнитным излучением.

Одной из основных характеристик процесса переноса теплоты является плотность теплового потока q , Вт/м², определяемая количеством теплоты, передаваемым в направлении наиболее быстрого уменьшения температуры через единичную площадку, расположенную перпендикулярно этому направлению, за единицу времени.

Его величина определяется характеристиками теплопередающей системы и имеющимся в ней перепадом температур ΔT , К.

Для процесса теплопроводности такой характеристикой является коэффициент теплопроводности вещества λ , Вт/м·К, через который плотность теплового потока определяется следующим образом:

$$q = \lambda \Delta T / l,$$

где l – расстояние, на котором имеет место перепад температур ΔT .

Наибольшими коэффициентами теплопроводности обладают металлы.

Для систем с разными механизмами переноса теплоты такой характеристикой является коэффициент теплопередачи k , Вт/м²·К, через который плотность теплового потока определяется следующим образом:

$$q = k \Delta T.$$

Чем больший тепловой поток может передавать система при меньшем перепаде температур, тем выше ее теплопередающая способность, тем большими значениями коэффициентов теплопроводности и теплопередачи она характеризуется.

Таким образом, если имеется необходимость передачи большого количества теплоты при малом перепаде температур, необходимо теплопередающее устройство с как можно большим коэффициентом теплопроводности или теплопередачи.

На сегодняшний день такими наиболее эффективными устройствами являются *тепловые трубы*.

Впервые идея тепловой трубы была предложена американским инженером Гоглером в 1942 г. Но только в начале 60-х годов, после того, как другой американский ученый Гровер, независимо от Гоглера, вновь предложил эту идею и в 1963 году запатентовал ее, тепловые трубы получили интенсивное развитие. К настоящему времени созданы тысячи модификаций тепловых труб с различными функциями.

Тепловая труба представляет собой устройство, обладающее очень высокой теплопередающей способностью. Если характеризовать ее эффективным коэффициентом теплопроводности, то он оказывается в сотни раз больше, чем у меди. Конструктивно тепловая труба представляет собой герметичный сосуд (чаще всего цилиндрическую трубу), заполненный жидкостью-теплоносителем. Высокая теплопередающая способность ее достигается за счет того, что в тепловой трубе осуществляется конвективный перенос тепла, со-

проводимый фазовыми переходами (испарением и конденсацией) жидкости-теплоносителя. При подводе теплоты к одному концу тепловой трубы (*испарителю*) жидкость нагревается, закипает и превращается в пар. При этом она поглощает большое количество теплоты (теплота парообразования), которое переносится паром к другому, более холодному концу трубы (*конденсатору*), где пар конденсируется и отдает теплоту. Например, для нагрева 1 кг воды от 0 до 100 °С требуется подвести количество теплоты равное 419 Кдж. Для того, чтобы превратить кипящую жидкость в пар той же температуры, надо подвести еще теплоту парообразования, равную 2260 кДж/кг, т. е. в 5,4 раза больше.

Далее сконденсированная жидкость опять возвращается в зону испарения. Этот возврат может осуществляться разными способами. Самый простой из них заключается в использовании силы тяжести (при вертикальном расположении тепловой трубы, когда зона конденсации находится выше зоны испарения). Такой вариант тепловой трубы называется *термосифоном*. Естественно, эффективность работы термосифона зависит от его ориентации относительно направления силы тяжести.

В наиболее распространенных типах тепловых труб для возврата жидкости в зону испарения используются капиллярные эффекты. Для этого на внутренней поверхности тепловой трубы располагают слой капиллярно-пористой структуры (*фитиль*), по которому под действием капиллярных сил и термодиффузии происходит обратное движение жидкости. Такая тепловая труба называется *тепловой трубой с фитилем* (рис. 9.1).

Основные преимущества таких тепловых труб:

- высокая эффективность теплообмена;
- автономность работы;
- малый вес и габариты;
- высокая надежность;
- возможность реализации сложных теплопередающих функций;
- изотермичность основной части поверхности трубы.

Тепловая труба может иметь различные формы и габариты. Внутренний диаметр труб составляет от нескольких миллиметров до десятка сантиметров, длина – до нескольких метров. Для изготовления корпусов и капиллярных структур (фитилей) используются стекло, керамика, различные металлы и сплавы.

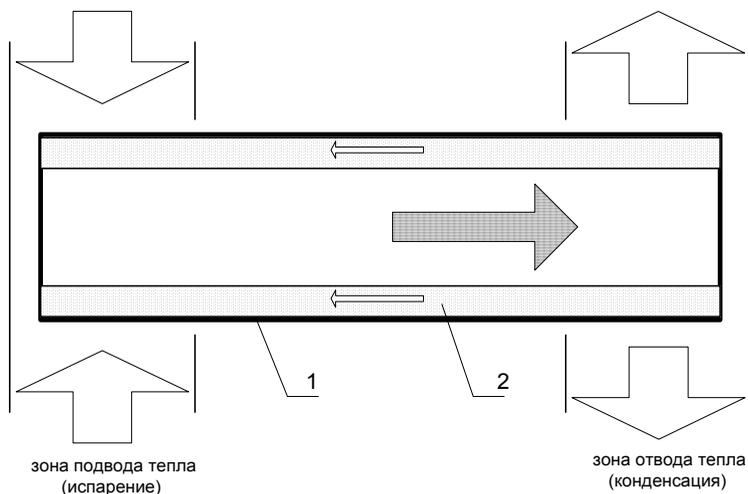


Рис. 9.1. Схема тепловой трубы с фитилем:
 1 – корпус; 2 – капиллярно-пористый слой (фитиль)

В настоящее время существует несколько десятков различных конструкций тепловых труб, которые классифицируются следующим образом:

1) по температурному диапазону:

- криогенные тепловые трубы – $T < 200$ К;
- низкотемпературные тепловые трубы – $T = 200\text{--}550$ К;
- тепловые трубы умеренного диапазона – $T = 550\text{--}750$ К;
- высокотемпературные тепловые трубы – $T > 750$ К;

2) по виду теплоносителей:

- металлические (натрий, калий, ртуть и т. д.);
- неметаллические (вода, аммиак, ацетон, фреоны, спирты, четыреххлористый углерод, бензины, криогенные жидкости и т. д.);

3) по параметрам, характеризующим работу тепловых труб:

- термическое сопротивление;
- плотность теплового потока через поперечное сечение трубы;
- плотность радиального теплового потока.

Наиболее характерными областями применения тепловых труб являются энергетика, электроника, машиностроение, химическая промышленность, сельское хозяйство. Широкое применение находят тепловые трубы при обеспечении тепловых режимов космиче-

ских аппаратов, для охлаждения электронных приборов и систем, создания регенеративных теплообменников.

С точки зрения использования возобновляемых источников энергии, тепловые трубы являются эффективным средством передачи теплоты в зимних условиях от незамерзающих нижних слоев Земли на ее поверхность. Как известно, в наших широтах даже при самых суровых зимах на глубине в несколько метров сохраняется плюсовая температура. Теплота этих слоев может быть передана на поверхность с помощью тепловых труб для поддержания, например, положительной температуры грунта в теплицах, а также для создания незамерзающих областей на поверхности Земли (тротуаров, участков автомобильных дорог, крыш построек и т. п.).

Некоторые примеры применения тепловых труб для прогрева поверхностей в зимних условиях представлены на рис. 9.2–9.6.



Рис. 9.2. Прокладка тепловых труб под дорожным полотном



Рис. 9.3. Незамерзающая дорога



Рис. 9.4. Незамерзающая автостоянка



Рис. 9.5. Незамерзающая крыша



Рис. 9.6. Гибкие тепловые трубы

Экспериментальная установка

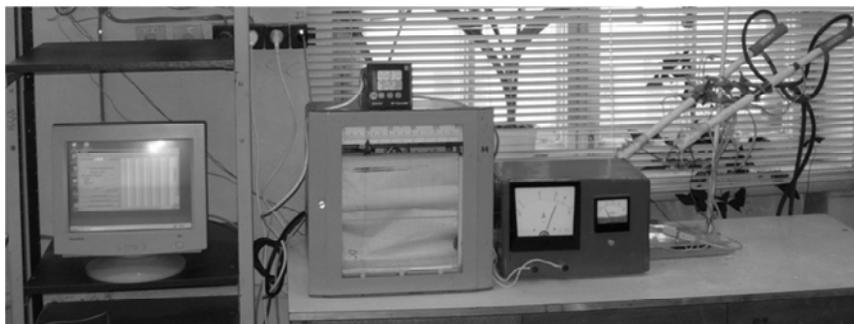


Рис. 9.7. Внешний вид экспериментальной установки

Основными элементами экспериментальной установки, внешний вид которой изображен на рис. 9.7, а схема – на рис. 9.8, являются укрепленные на штативах тепловая труба с фитилем 1 и медный стержень 2 одинаковой длины l и диаметра d . На нижних концах трубы и стержня установлены электрические нагреватели 3 (для подвода теплоты в зоне испарения) одинаковой мощности, на которые подается электрическое напряжение от блока питания 4 . Генерируемая нагревателями тепловая мощность N , Вт, определяется произведением тока I , А, и напряжения U , В, в них, которые измеряются соответствующими амперметром и вольтметром:

$$N = IU.$$

Верхние концы тепловой трубы и стержня находятся в холодильнике 5 и охлаждаются проточной водопроводной водой (для отвода теплоты в зоне конденсации). По длине трубы и стержня установлено по три термомпары 6 (две по концам и одна в центре), определяющие температуры в соответствующих точках. Показания термомпар через коммутационные устройства 7 регистрируются самопишущим потенциометром или компьютером 8 .

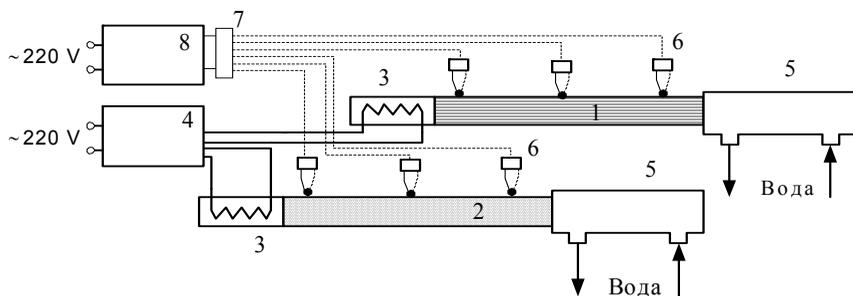


Рис. 9.8. Схема лабораторной установки:
 1 – тепловая труба с фитилем; 2 – медный стержень;
 3 – электрический нагреватель; 4 – блок питания; 5 – холодильник;
 6 – датчики температуры (термопары); 7 – коммутатор;
 8 – самопишущий потенциометр (компьютер)

Порядок выполнения работы

1. Открыть кран системы охлаждения тепловой трубы и медного стержня.
2. Включить блок питания электрических нагревателей тепловой трубы и медного стержня и зафиксировать показания вольтметра и амперметра. Определив общую мощность N и разделив ее пополам, получить мощность N_1 каждого из нагревателей тепловой трубы и медного стержня и занести эти данные в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Результаты измерений

Параметр	Тепловая труба	Медный стержень
Мощность нагревателей N_1 , Вт		

3. Включить питание потенциометра (компьютер).

Поочередно опрашивая все шесть термопар, установленных в тепловой трубе и медном стержне, потенциометр (компьютер) будет выдавать их показания через определенные промежутки времени. По мере прогрева тепловой трубы и медного стержня будет наблю-

даться рост температуры в каждой точке с постепенным выходом на постоянное значение (стационарный режим). Стационарным можно считать режим, при котором значения температуры изменяются с течением времени не более, чем на 10 %.

Обратите внимание на то, что выход тепловой трубы на стационарный режим осуществляется гораздо быстрее, чем медного стержня.

4. Через каждые 2 минуты до выхода на стационарный режим снимать показания потенциометра и заносить их в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Показания термопар, °С

№ термопары \ Время, мин	1	2	3	4	5	6
0						
2						
4						
6						
8						
10						
12						
$\lambda_{эф}$						

Обработка экспериментальных данных

При обработке экспериментальных данных можно считать, что вся потребляемая каждым нагревателем электрическая мощность N_1 превращается в тепловую и полностью передается через тепловую трубу и медный стержень. При этом пренебрегаем потерями теплоты через их боковые теплоизолированные поверхности. Тогда тепловой поток как в стержне, так и в тепловой трубе, определяемый количеством теплоты, передаваемым через их поперечное сечение площадью S , м², в единицу времени, будет равен мощности нагревателей N_1 . А плотность этого теплового потока

$$q = N_1 / S, \text{ Вт/м}^2.$$

В этом случае эффективный коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{\text{эф}} = ql / \Delta T$$

каждого из исследуемых объектов будет определяться следующим соотношением:

$$\lambda_{\text{эф}} = 4N_1 l / (\pi d^2 \Delta T), \quad (9.1)$$

где ΔT – перепад температур по всей длине объектов l , определяемый по разности показаний крайних термомпар (№ 1 и № 3 для тепловой трубы и № 4 и № 6 для медного стержня) в стационарном режиме;

d – диаметр объекта.

1. Используя полученные экспериментальные данные, вычислить по формуле (9.1) эффективные коэффициенты теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ для тепловой трубы и медного стержня, занести их в табл. 9.2 и убедиться в том, что значения этого коэффициента у тепловой трубы значительно выше, чем у медного стержня.

2. Построить график зависимости средней температуры тепловой трубы и медного стержня во времени (по показаниям средних термомпар – № 2 и № 5). Убедиться, что тепловая труба значительно быстрее выходит на стационарный режим работы.

3. Построить график распределения температур по длине тепловой трубы и медного стержня по показаниям всех термомпар в стационарном режиме.

4. Убедиться в том, что распределение температуры вдоль медного стержня близко к линейному, а определенное значение коэффициента теплопроводности близко к табличному для меди.

5. Принять во внимание, что определенный коэффициент теплопроводности для тепловой трубы может так называться только условно и обязательно сопровождаться термином «эффективный», поскольку основным механизмом переноса теплоты в нем является не теплопроводность, а конвекция. Тем не менее, сравнение этой величины с коэффициентом теплопроводности медного стержня дает представление о соотношении их теплопередающих способностей.

Лабораторная работа № 10

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОЙ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Цель работы: изучение принципа действия и характеристик теплового насоса и способов использования природной низкопотенциальной теплоты с его помощью.

Общие сведения

Альтернативой традиционным способам теплоснабжения, основанным на сжигании топлива, является выработка тепла с помощью теплового насоса.

Тепловой насос – это устройство, которое преобразовывает низкопотенциальную теплоту в высокопотенциальную. Потенциал преобразованной теплоты, как правило, должен быть пригоден для использования в системах теплоснабжения.

Другими словами, тепловой насос обладает способностью переносить теплоту от менее нагретого тела к более нагретому.

Поскольку естественным образом такой процесс в природе не реализуем, в тепловом насосе это осуществляется за счет совершения работы с помощью внешнего устройства (компрессора) над циркулирующим в нем теплоносителем.

При этом количество высокопотенциальной теплоты, вырабатываемой тепловым насосом в 2–3 раза больше, совершаемой в нем работы. Это означает, например, что если для работы компрессора необходимо сжигание некоторого количества топлива, то получаемое количество теплоты в 2–3 раза больше, чем количество теплоты, полученное при прямом сжигании этого топлива.

Отношение переданной теплоты Q к затраченной при этом работе L называется *коэффициентом преобразования теплового насоса*:

$$\eta = Q / L.$$

Чем этот коэффициент больше, тем эффективнее тепловой насос. У современных тепловых насосов этот коэффициент может достигать значение 4.

Схема работы теплового насоса представлена на рис. 10.1.

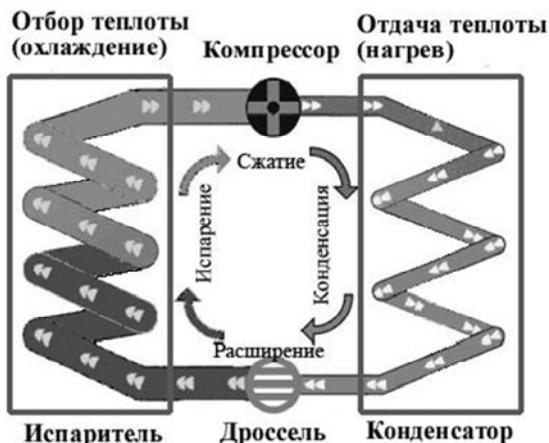


Рис. 10.1. Основные элементы и принципиальная схема работы теплового

Основными элементами теплового насоса являются теплообменники для отбора низкопотенциальной теплоты (испаритель) и для отдачи высокопотенциальной теплоты (конденсатор), компрессор, дроссель и соединяющие их трубы.

Низкопотенциальная теплота Q_2 поступает в испаритель теплового насоса, где ее воспринимает рабочее тело (хладагент), циркулирующее в цикле. Как уже говорилось, источником низкопотенциальной теплоты могут быть наружный воздух, природные водоемы, грунт, питьевая вода, промышленные стоки, вентиляционные выбросы и т. д. В качестве хладагентов в циклах используются теплоносители с низкой температурой кипения – углекислота, аммиак, фреоны. Хладагент поступает в испаритель в жидком состоянии. В процессе подвода теплоты Q_2 к жидкому хладагенту происходит его превращение в пар (при постоянном давлении и температуре). Пары хладагента поступают в компрессор, где сжимаются, повышается их давление и температура. При сжатии в компрессоре от внешнего источника (электродвигателя) подводится работа $l_{\text{цикла}}$. Нагретые пары хладагента поступают в конденсатор, где отдают свое тепло Q_1 в систему отопления помещения и за счет отдачи теплоты конденсируются (превращаются в жидкость) при постоянном давлении и тем-

пературе. Жидкий хладагент поступает в дроссель, где его давление падает до давления в испарителе, а температура снижается до температуры низко потенциального источника. Цикл замыкается.

Термодинамический цикл теплового насоса в переменных температуре (T) – энтропия (S) представлен на рис. 10.2.

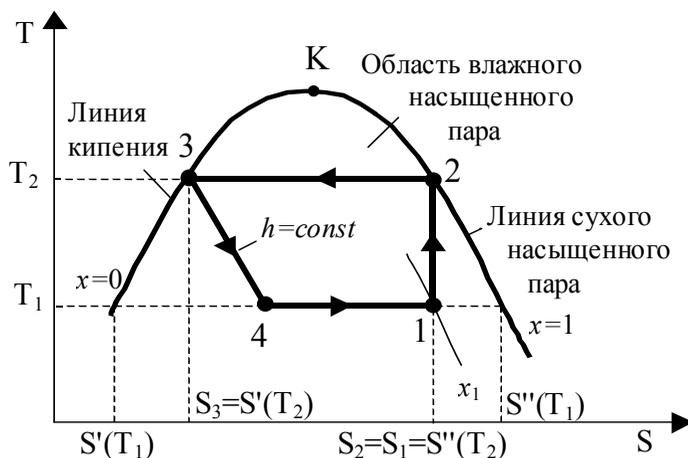


Рис. 10.2. Термодинамический цикл теплового насоса:

- 1–2 – адиабатное сжатие хладагента в компрессоре;
- 2–3 – отвод теплоты из конденсатора в систему отопления помещения при постоянном давлении P ($P_2 = \text{const}$, $T_2 = \text{const}$);
- 3–4 – дросселирование при постоянной энтальпии h ;
- 4–1 – подвод низкопотенциальной теплоты из окружающей среды к испарителю ($P_1 = \text{const}$, $T_1 = \text{const}$).

Учитывая тот факт, что тепловой насос вовлекает в полезное использование низкопотенциальное тепло природного происхождения (тепло грунта, природных водоемов, грунтовых вод, воздуха) и техногенного происхождения (промышленные стоки, очистные сооружения, вентиляция и т. д.) с температурой $+3\dots+40$ °С, которое не может быть напрямую использовано для теплоснабжения, а на выходе получает воду с температурой $+50\dots+80$ °С, эффективность его применения является очевидной.

Естественно, что тепловые насосы довольно интенсивно вытесняют традиционные способы теплоснабжения, основанные на сжигании органического топлива.

Согласно прогнозам Мирового энергетического комитета (МИРЭЖ), к 2022 г. 75 % теплоснабжения (коммунального и производственно-го) в развитых странах будет осуществляться с помощью тепловых насосов.

Этот прогноз успешно подтверждается. В настоящее время в мире работает 15–18 млн тепловых насосов различной мощности – от нескольких киловатт до сотен мегаватт. В США более 30 % жилых домов оборудованы тепловыми насосами. В Швеции с 1984 г. по 1986 г. введены в эксплуатацию 74 крупные (от 5 до 80 МВт) теплонасосные станции. Наиболее крупной теплонасосной установкой является стокгольмская установка мощностью 320 МВт, работающая на принципе охлаждения воды, поступающей из Балтийского моря. Эта установка, расположенная на причаленных к берегу баржах, использует даже зимой морскую воду с температурой 4 °С, охлаждая ее до 2 °С. Себестоимость теплоты от этой установки на 20 % ниже себестоимости теплоты, получаемой от газовой котельной. Общее количество теплоты, вырабатываемой теплонасосными установками в Швеции, составляет около 50 % от потребного.

Экспериментальная установка

Внешний вид экспериментального стенда и его схема представлены ниже, на рис. 10.3 ,10.4.



Рис. 10.3. Внешний вид экспериментального стенда

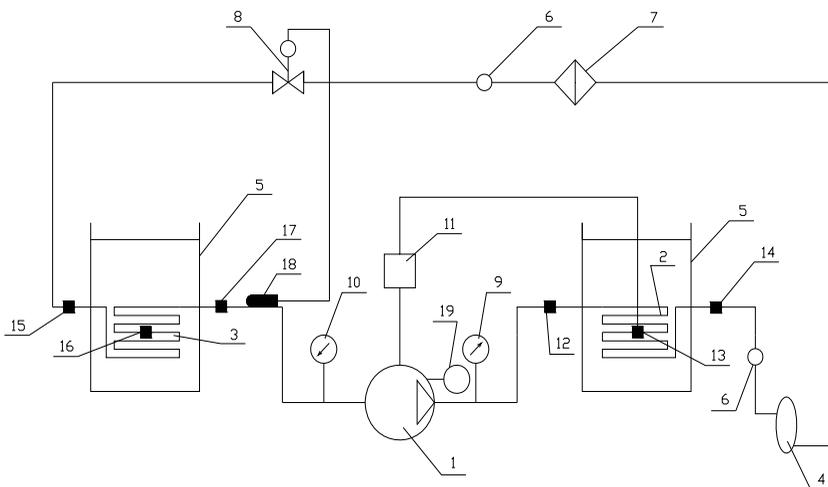


Рис. 10.4. Схема экспериментального стенда:

- 1 – компрессор; 2 – змеевиковый конденсатор; 3 – змеевиковый испаритель;
- 4 – ресивер; 5 – емкости наполненные водой; 6 – смотровой глазок;
- 7 – фильтр-осушитель; 8 – терморегулирующий вентиль (дрессель);
- 9 – манометр высокого давления; 10 – манометр низкого давления;
- 11 – контроллер; 12 – датчик температуры на входе в конденсатор (№ 1);
- 13 – датчик температуры воды нагреваемой конденсатом (№ 2);
- 14 – датчик температуры на выходе из конденсатора (№ 2);
- 15 – датчик температуры на входе в испаритель (№ 4);
- 16 – датчик температуры воды охлаждаемой испарителем (№ 5);
- 17 – датчик температуры на выходе из испарителя (№ 6);
- 18 – термобаллон; 19 – амперметр

Экспериментальный стенд состоит из:

- *компрессора* Атлант С-КО-200-Н5-02 поршневого типа, предназначенного для непосредственного сжатия пара поступающего из испарителя до необходимого давления;

- *конденсатора*, представляющего собой змеевик согнутый из медных трубок; служит для конденсации горячего пара, поступающего из компрессора, при этом будет происходить подогрев воды в емкости, в которой находится сам конденсатор;

- *испарителя*, представляющего собой змеевик согнутый из медных трубок; служит для выкипания хладагента, прошедшего через терморегулирующий вентиль, при этом хладагент забирает тепло из емкости, в которой находится испаритель;

– *фильтра-осушителя*, который находится на линии после конденсатора и служит для предотвращения попадания влаги и мелких частиц;

– *терморегулирующего вентиля (ТРВ) (дросселя)*, который служит для сброса давления до давления кипения хладагента и поддержания заполнения испарителя на заданном уровне;

– *смотрового глазка*, который показывает наличие жидкого хладагента и степень содержания в нем влаги при помощи индикатора, расположенного по внутреннему диаметру глазка;

– *ресивера*, который используется в качестве накопителя для хранения жидкого хладагента под давлением и как компенсатор;

– *контроллера*, который служит для отключения компрессора от электропитания при достижении определенной температуры в емкости с жидкостью, в которой находится конденсатор (заданная температура отключения $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ плюс дифференциал в $2\text{ }^{\circ}\text{C}$), и для контроля изменения температуры в емкости;

– *датчиков температур*, которые необходимы для контроля рабочих параметров установки в целом, и контролируют температуры кипения на входе и выходе испарителя, температуры жидкости в емкостях, температуры конденсации на входе и выходе конденсатора;

– *амперметра*, предназначенного для измерения потребляемого электродвигателем компрессора тока из питающей сети напряжением 220 В .

Порядок выполнения работы

1. Зафиксировать температуры воды в баках на испарителе $T_{и}$ и конденсаторе $T_{к}$, массы воды $M_{и}$, $M_{к}$, кг, в них и занести их в табл. 10.1.

2. Подготовить установку к работе. Для этого необходимо последовательно выполнить следующие действия:

- а) через ваттметр подключить холодильный агрегат к сети;
- б) включить датчики температур и контроллер;
- в) запустить компрессор;
- г) начать отсчет времени работы установки.

3. Выполнить экспериментальные исследования. Для чего:

а) через каждые 2 минуты заносить в табл. 10.1 значения температур воды на испарителе и конденсаторе;

б) зафиксировать момент выхода установки на стационарный режим, о чем будет свидетельствовать стабильность давлений на манометрах (обычно около 1 мин после включения установки);

в) занести в табл. 10.1 для стационарного режима показания датчиков температур и контроллера, параметры давлений и температур на манометрах, а также потребляемые компрессором ток I , A , и мощность N , $Вт$, по показаниям амперметра и ваттметра;

г) при достижении температуры воды на конденсаторе $40\text{ }^{\circ}C$ установка запрограммирована на отключение; при отключении установки зафиксировать последние значения температур воды на испарителе и конденсаторе и время завершения эксперимента;

д) По показаниям ваттметра определить затраченную компрессором работу A , $Дж$.

4. Отключить последовательно компрессор, контроллер, датчики температур и питающую сеть.

Внимание! Установку повторно включать можно только после выравнивания давления на манометрах (приблизительно через 30–40 мин после выключения). При несоблюдении этого требования возможен выход из строя компрессора.

Обработка экспериментальных данных

1. Определить количество теплоты $Q_{и}$, $Дж$, отданное водой на испарителе за время эксперимента

$$Q_{и} = C_p M_{и} (T_{иК} - T_{и0}).$$

где C_p – удельная теплоемкость воды, $C_p = 4,19\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

$M_{и}$ – масса воды в баке на испарителе;

$T_{иК}$, $T_{и0}$ – конечная и начальная температуры воды в баке на испарителе.

2. Определить количество теплоты, полученной водой на конденсаторе:

$$Q_{к} = C_p M_{к} (T_{кК} - T_{к0}).$$

3. Вычислить коэффициент преобразования теплового насоса:

$$\eta = Q_k / L.$$

4. Все данные занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Результаты измерений и вычислений

Время t , мин	0	2	4	6	...
$T_{н2}$, °С					
$T_{к2}$, °С					
I , А					
N , Вт					
L , Дж					
$M_{н2}$, кг					
$M_{к2}$, кг					
$Q_{н2}$, Дж					
$Q_{к2}$, Дж					
η					

6. ОСНОВЫ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Лабораторная работа № 11

ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Цель работы: изучение основных принципов водородной энергетики и работы топливного элемента с протоннообменной мембраной.

Общие сведения

Водородная энергетика

Водородная энергетика является в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений решения проблем обеспечения человечества тепловой и электрической энергией.

Водородная энергетика основывается на использовании водорода в качестве средства для производства, аккумулирования и транспортировки энергии.

Основными достоинствами водорода являются:

- экологическая безопасность, поскольку продуктом его сгорания является вода;
- исключительно высокая удельная теплота сгорания, равная 143,06 МДж/кг (для сравнения, удельная теплота сгорания условного топлива равна 29,3 МДж/кг);
- низкая вязкость, что очень важно при его транспортировании по трубопроводам;
- практически неограниченные запасы, если в качестве исходного соединения для его получения рассматривать воду;
- возможность его использования как самостоятельного топлива, так и в виде добавок к существующим моторным топливам.

В настоящее время водород в больших количествах производится и используется в мире во многих технологических процессах, основными из которых являются производство бензина и аммиака. Только США ежегодно производят около 11 млн т водорода. Для его транспортировки в США действует 750 км, а в Европе 1500 км водородных трубопроводов. Трубопроводы действуют при давлении 10–20 бар и изготовлены из стальных труб диаметром 25–30 см. Старейший водородный трубопровод действует в районе герман-

ского г. Рур, 210 км трубопровода соединяют 18 производителей и потребителей водорода. Трубопровод действует более 50 лет без аварий. Самый длинный трубопровод длиной 400 км проложен между Францией и Бельгией. После небольших изменений водород может передаваться по существующим газопроводам природного газа.

Департамент энергетики США прогнозирует, что стоимость водорода сравняется со стоимостью бензина в ближайшие годы.

Существует множество методов промышленного производства водорода. Среди них:

- паровая конверсия природного газа / метана, при которой водяной пар при температуре 700–1000 °С смешивается с метаном под давлением в присутствии катализатора; в настоящее время данным способом производится примерно половина всего водорода;

- электролиз воды, при этом вода разлагается на водород и кислород при пропускании через нее электрического тока;

- газификация угля, при этом уголь нагревают при температуре 800–1300 °С без доступа воздуха; это старейший способ получения водорода; первый газогенератор был построен в Великобритании в 40-х гг. XIX в.;

- переработка биомассы, при которой водород получается термохимическим, или биохимическим способом; при термохимическом методе биомассу нагревают без доступа кислорода до температуры 500–800 °С (для отходов древесины), что намного ниже температуры процесса газификации угля, в результате процесса выделяется H_2 , CO и CH_4 ; в биохимическом процессе водород вырабатывают различные бактерии.

Для получения водорода также предполагается широко использовать атомную энергию.

Наиболее привлекательным, с экологической точки зрения, является цикл использования водорода для энергетических целей, представленный на рис. 11.1 и реализованный в настоящей лабораторной работе. Водород получается из воды путем электролиза с использованием возобновляемых источников энергии, например, фотоэлектрической батареи, затем сжигается в энергетической установке, выделяя в качестве продукта сгорания опять воду, которая вновь вводится в энергетический кругооборот.

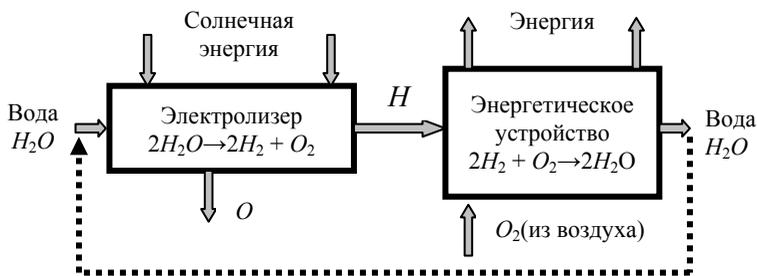


Рис. 11.1. Экологически чистый водородный энергетический цикл

Топливные элементы

Из всех, разработанных к настоящему времени энергетических устройств, использующих водород в качестве топлива, наиболее привлекательными являются топливные элементы.

Топливный элемент – это электрохимический источник электрической энергии, устройство, обеспечивающее прямое преобразование химической энергии в электрическую.

Основными частями топливного элемента являются электроды, разделенные электролитом, и системы подвода топлива на один электрод и окислителя – на другой, а также системы для удаления продуктов реакции.

Совокупность батареи топливных элементов и устройств для подачи реагентов и ее регулирования, отвода продуктов реакции и тепла (которое может утилизироваться) представляет собой *электрохимический генератор*.

Внешней электрической цепью топливный элемент соединен с нагрузкой, которая потребляет электроэнергию.

Хотя схожее устройство и принцип действия имеют гальванические элементы и электрические аккумуляторы, топливные элементы имеют два важных отличия:

- 1) в них из внешнего источника непрерывно подаются топливо и окислитель и они функционируют до тех пор, пока эти компоненты поступают;
- 2) химический состав электролита в процессе работы не изменяется, т. е. топливный элемент не нуждается в перезарядке.

Таким образом, топливный элемент способен работать практически неограниченное время, пока в него поступают реагенты и происходит отвод продуктов.

Важнейшим преимуществом топливных элементов, как и всех других электрохимических генераторов, является отсутствие подвижных механических частей, типа вращающихся роторов и т. п.

Получение электрической энергии в топливных элементах происходит, минуя процессы горения, превращения тепловой энергии в механическую, а последней – в электрическую.

Благодаря этим обстоятельствам, коэффициент полезного действия (КПД) топливных элементов не ограничен, как у тепловых машин цикла Карно, а может быть значительно выше. Сравнение КПД разных энергетических технологий представлено ниже, на рис. 11.2.

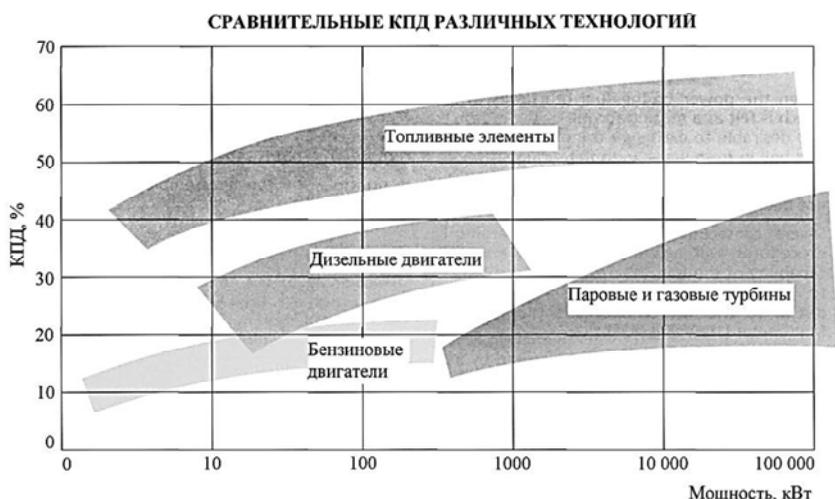


Рис. 11.2. Сравнительные КПД различных технологий преобразования энергии

К достоинствам топливных элементов можно также отнести и то, что они легче и имеют меньшие габариты, чем традиционные источники питания с такими же характеристиками. Они производят меньше шума, меньше нагреваются, более эффективны с точки зрения потребления топлива.

Топливом в топливном элементе чаще всего служит водород, а окислителем – кислород или воздух. Можно использовать и природный газ, однако при использовании углеводородного топлива неизбежен определенный уровень выбросов двуокиси углерода.

В последнее время, когда вопросы надежности электроснабжения и экологические проблемы приобрели особенно важное значение, многие фирмы в Европе, Японии и США приступили к разработке и производству нескольких вариантов топливных элементов.

Исландия – первая в мире страна, решившая отказаться от использования ископаемых энергоносителей и полностью перейти к 2030 году на водородную энергетику, причем как на суше, так и на море. Здесь планируется оснастить топливными элементами 12 000 судов.

Основными областями применения топливных элементов являются:

- стационарные источники электрической энергии: производство электрической энергии (на электрических станциях), аварийные источники энергии, автономное электроснабжение;

- транспорт: электромобили, морские суда, железнодорожная техника, вспомогательный транспорт (складские погрузчики, аэродромная техника и т. п.);

- бортовое питание: авиационная и космическая техника, подводные лодки, морской транспорт;

- мобильные устройства: портативная электроника, сотовые телефоны, зарядные устройства.

На базе топливных элементов в США и Японии созданы опытные электростанции мощностью около 10 МВт.

Некоторые примеры использования топливных элементов приведены на рис. 11.3–11.6.



Рис. 11.3. Топливный элемент для питания персонального компьютера



Рис. 11.4. Самолет компании Boeing на топливных элементах



Рис. 11.5. Зарядное устройство компании Toshiba на топливном элементе



Рис. 11.6. Автобус на топливных элементах в Лондоне

Топливный элемент с протоннообменной мембраной

Одна из самых распространенных конструкций топливных элементов использует в качестве твердого электролита протоннообменную мембрану (Proton Exchange Membrane) PEM. Особенностью PEM является то, что она способна пропускать через себя протоны и не пропускает электроны. Обычно электроды такого топливного элемента выполнены из графита, покрытого платиновым катализатором. На таком электроде, являющимся анодом, молекула водорода H_2 диссоциирует (распадается) на атомы, а атом водорода H диссоциирует на положительно заряженный протон H^+ и отрицательно заряженный электрон e^- . Таким образом, на аноде топливного элемента протекает реакция



Образующиеся на аноде электроны поступают во внешнюю цепь, создавая в ней электрический ток. По внешней цепи, совершая работу на нагрузке, эти электроны возвращаются в топливный элемент, но уже на другой электрод (катод). На катоде электроны объединяются с прошедшими на него через мембрану протонами, образуя атомы водорода. Атомы водорода на катоде соединяются с подаваемыми на него из внешнего источника атомами кислорода, образуя продукт горения водорода – воду. Последняя отводится во внешнюю среду. Таким образом, на катоде протекает следующая реакция

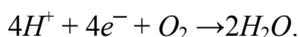


Схема описанного выше топливного элемента показана на рис. 11.7.

Конструкция используемого в лабораторной работе топливного элемента представлена ниже, на рис. 11.8.

Описанный выше и используемый в настоящей работе топливный элемент является обратимым. Это значит, что если осуществить обратный процесс, то есть на его электроды подать постоянное электрическое напряжение и заполнить его водой, то в нем будет происходить обратная реакция – электролиз воды, то есть разложение ее на водород и кислород.

Это обстоятельство используется на одном из этапов выполнения настоящей работы для получения водорода.

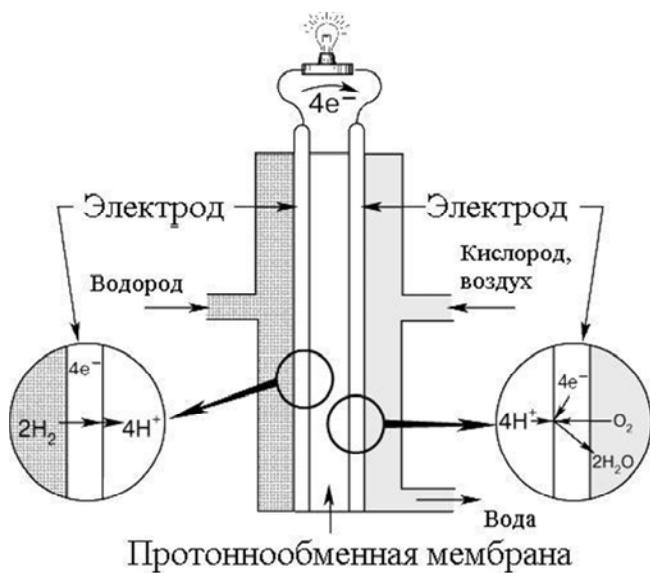


Рис. 11.7. Схема топливного элемента с протоннообменной мембраной

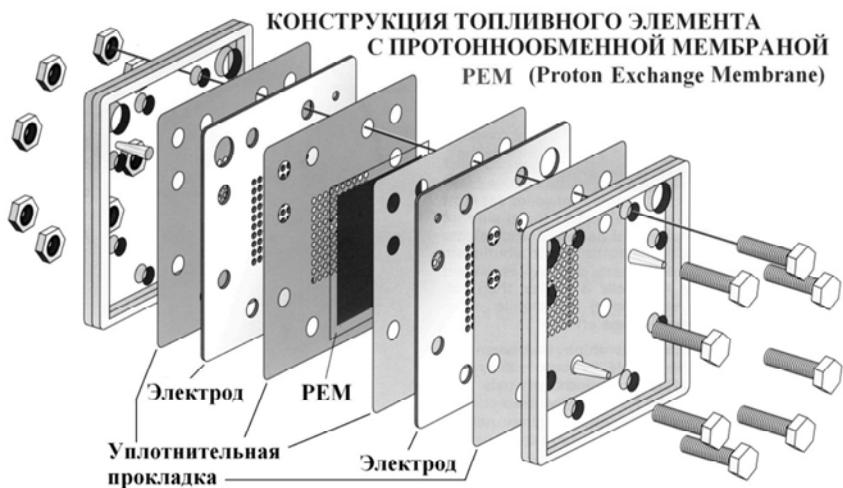


Рис. 11.8. Конструкция топливного элемента с протоннообменной мембраной

Экспериментальная установка

Основные элементы экспериментальной установки изображены на рис. 11.9 и представляют собой:

- топливный элемент;
- электродвигатель;
- фотоэлектрическую батарею;
- источник света;
- емкости для сбора и хранения водорода и кислорода.

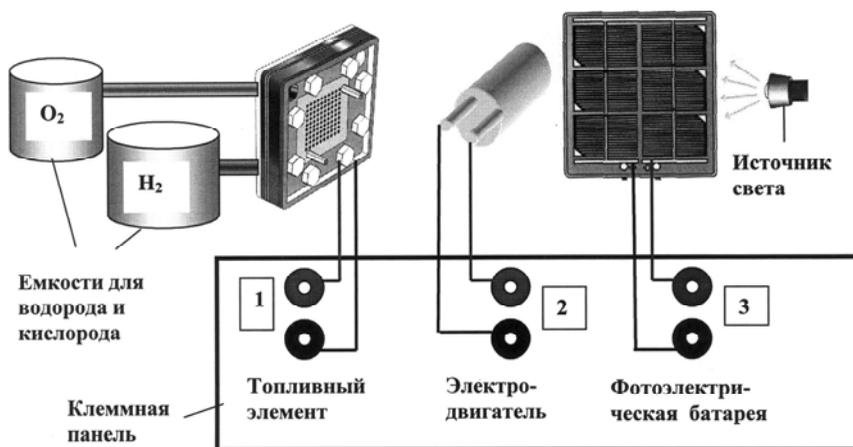


Рис. 11.9. Схема экспериментальной установки

Емкости для водорода и кислорода погружены в заполненный дистиллированной водой сосуд и соединены с топливным элементом. В начальный момент времени топливный элемент и эти емкости заполнены водой. По мере производства водорода и кислорода при электролизе в топливном элементе и поступления этих газов в соответствующие емкости, вода из них вытесняется.

Электрические контакты от элементов установки выведены на общую клеммную панель, что позволяет осуществлять их соединение в любой комбинации.

Порядок выполнения работы

Выполнение работы состоит из трех заданий:

1. Изучение работы и характеристик фотоэлектрической батареи.
2. Осуществление электролиза воды и получение водорода и кислорода.
3. Получение электрической энергии с помощью топливного элемента.

При выполнении лабораторной работы требуется миллиамперметр для измерения электрического тока порядка 100 мА и вольтметр для измерения напряжения порядка 1 В. Напоминаем, что вольтметр включается в электрическую цепь параллельно, а амперметр – последовательно, как изображено на рис. 11.10.

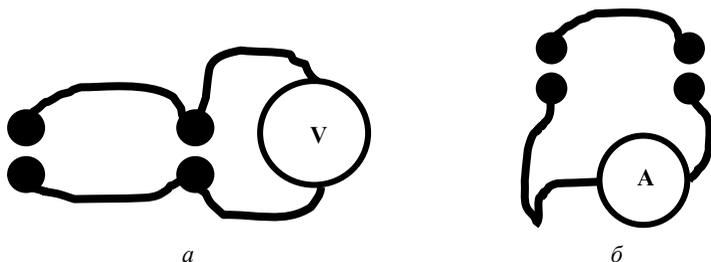


Рис. 11.10. Схемы подключения вольтметра (а) и амперметра (б)

Задание 1. Изучение работы и характеристик фотоэлектрической батареи:

1. Соединить проводами одноименные (одного цвета) клеммы электродвигателя 2 и фотоэлектрической батареи 3, как изображено ниже, на рис. 11.11.
2. Включить источник света и, направив его на фотоэлектрическую батарею, отрегулировать его положение так, чтобы электродвигатель пришел во вращение. После этого положение источника света не изменять.
3. С помощью тестера измерить напряжение $U_{1дв}$ и ток $I_{1дв}$ в цепи электродвигателя. Умножив одно на другое вычислить мощность N_1 , вырабатываемую батареей.
4. Отсоединив электродвигатель, измерить напряжение на фотоэлектрической батарее, которое называется напряжением холостого

хода U_{1xx} . Обратите внимание на то, что напряжение на фотоэлектрической батарее под нагрузкой $U_{1дв}$ меньше, чем на холостом ходу U_{1xx} .

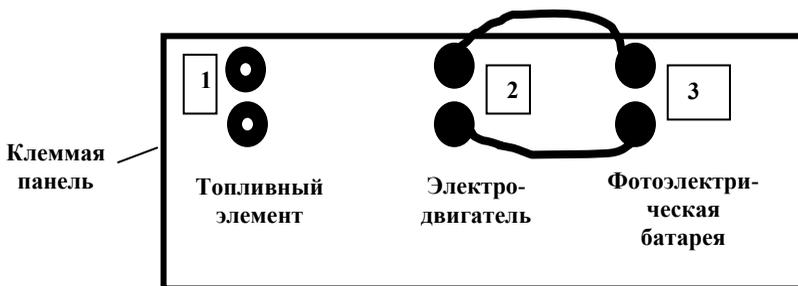


Рис. 11.11

Задание 2. Осуществление электролиза воды и получение водорода и кислорода:

1. Соединить проводами одноименные (одного цвета) клеммы топливного элемента 1 и фотоэлектрической батареи 3, как изображено ниже, на рис. 11.12 (включенный источник света остается в прежнем положении). Под действием электрического тока фотоэлектрической батареи в топливном элементе начинается процесс электролиза воды.

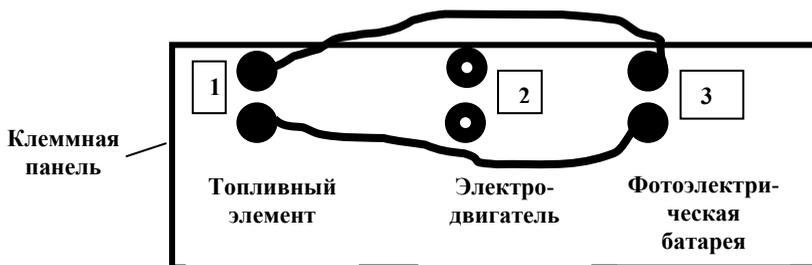


Рис. 11.12

2. С помощью тестера измерить напряжение U_3 и ток I_3 в цепи. Умножив одно на другое, вычислить мощность N_3 , вырабатываемую батареями.

3. Наблюдать за наполнением соответствующих емкостей водородом и кислородом, выделяемых в процессе электролиза воды. Об этом будет свидетельствовать понижение уровня воды в емкостях, вытесняемой газами.

4. Прекратить процесс электролиза, разъединив топливный элемент и фотоэлектрическую батарею, когда уровень воды в емкостях будет соответствовать примерно половине их высоты. На это потребуется примерно 10 минут.

Задание 3. Получение электрической энергии с помощью топливного элемента:

1. Выключить источник света.

2. Соединить проводами одноименные (одного цвета) клеммы топливного элемента 1 и электродвигателя 2, как изображено ниже на рис. 11.13. Двигатель должен заработать.

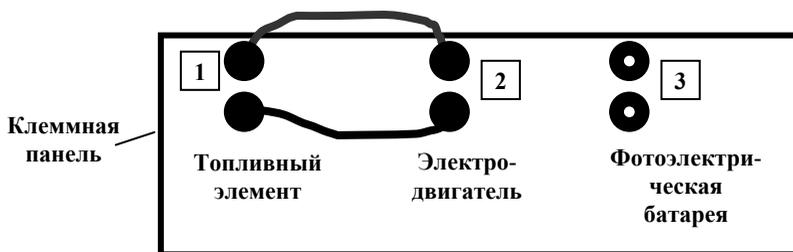


Рис. 11.13

3. Наблюдать за процессом расходования водорода и кислорода в соответствующих емкостях. Об этом будет свидетельствовать повышение уровня воды в емкостях.

4. С помощью тестера измерить напряжение $U_{2дв}$ и ток $I_{2дв}$ в цепи электродвигателя. Умножив одно на другое, вычислить мощность N_2 , вырабатываемую топливным элементом.

5. Отсоединив электродвигатель, измерить напряжение на топливном элементе, которое будет являться для него напряжением холостого хода $U_{2хх}$. Обратит внимание на то, что напряжение на топливном элементе под нагрузкой $U_{2дв}$ меньше, чем на холостом ходу $U_{2хх}$.

6. Убедиться в том, что в результате осуществленного цикла по заданиям 1–3 как начальным, так и конечным веществом, участвующим в цикле, является вода.

Обработка экспериментальных данных

Занести данные измерений и вычислений в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Результаты измерений и вычислений

Задание 1				Задание 2			Задание 3			
$U_{1дв},$ В	$U_{1хх},$ В	$I_{1дв},$ мА	$N_1,$ мВт	$U_3,$ В	$I_3,$ мА	$N_3,$ мВт	$U_{2дв},$ В	$U_{2хх},$ В	$I_{2дв},$ мА	$N_2,$ мВт

ЛИТЕРАТУРА

1. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 393 с.
2. Баштовой, В. Г. Энергия биомассы : учебно-методический комплекс / В. Г. Баштовой, Н. Г. Хутская, Г. И. Пальченок. – Минск : БНТУ. 2006. – 123 с.
3. Хутская, Н. Г. Топливо и его использование : лабораторный практикум / Н. Г. Хутская, Г. И. Пальченок. – Минск : БНТУ, 2006. – 69 с.
4. Справочник потребителя биотоплива / под. ред. В. Вареса. – Таллинн : Издательство Таллиннского технического университета, 2005. – 183 с.
5. Бородуля, В. А. Термохимическая конверсия биомассы в кипящем слое: производство энергии и высокотехнологичных материалов / В. А. Бородуля [и др.] // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену. – Минск, 2008. – 22 с.
6. Renewables make the difference / European Commission. – Luxembourg : Publications Office of the EU, 2010. – 23 p.
7. Ермашкевич, В. Н. Биомасса – топливно-энергетические ресурсы Беларуси. Механизм реализации потенциала / В. Н. Ермашкевич, Е. В. Мещерякова; под ред. П. Г. Никитенко. – Минск : Право и экономика, 2001. – 81 с.
8. Holm-Nielsen, J. B. Predicted Energy Crop Potentials for Bioenergy, Worldwide and for EU-25 / J. B. Holm-Nielsen, M. Madsen, P. O. Popiel // Proceedings of the World Bioenergy – 2006; International Conference and Exhibition. – Jonkoping, 2006. – P. 79–89.
9. Sinha, S. Modeling of pyrolysis in wood: a review / S. Sinha [etc.]. – New Delhi : SESI-Journal, 2000. – Vol. 10. – P. 41–62.
10. Antal M. J. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production / M. J. Antal, Jr., M. Grønli // Ind. Eng. Chem. Res. – 2003. – Vol. 42. – P. 1619–1640.
11. Antal, M. J. The UH/HNEI black gold from green waste project / M. J. Antal, Jr. // Hawaii Natural Energy Institute. – USA, 2003.
12. U.S.A. Patent 5,551,958. 1996 / M. J. Antal, Jr. Process for Charcoal production from woody and herbaceous plant material.
13. Goyal, H. B. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources : a review / H. B. Goyal, Seal Diptendu, R. C. Saxena // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2008. – Vol. 12. – P. 504–517.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Прямое преобразование солнечной энергии в электрическую	3
Лабораторная работа № 1. Исследование фотоэлектрического преобразователя энергии – солнечного модуля	6
Лабораторная работа № 2. Исследование принципов преобразования постоянного тока фотоэлектрического модуля в переменный ток промышленных параметров	14
2. Преобразование солнечной энергии в тепловую. Исследование солнечных коллекторов	17
Лабораторная работа № 3. Исследование плоского солнечного коллектора.....	18
Лабораторная работа № 4. Исследование вакуумного солнечного коллектора.....	22
3. Преобразование энергии ветра в электрическую энергию	28
Лабораторная работа № 5. Исследование ветроэнергетической установки.....	28
4. Использование энергии биомассы	36
Лабораторная работа № 6. Определение влажности биотоплива	36
Лабораторная работа № 7. Определение зольности биотоплива	42
Лабораторная работа № 8. Определение выхода летучих веществ биотоплива.....	50
5. Использование природной низкопотенциальной теплоты	57
Лабораторная работа № 9. Использование природной низкопотенциальной теплоты с помощью тепловых труб	58
Лабораторная работа № 10. Использование природной низкопотенциальной теплоты с помощью тепловых насосов.....	68
6. Основы водородной энергетики	76
Лабораторная работа № 11. Топливный элемент	76
Литература	89

Учебное издание

НОВИК Андрей Владимирович
РЕКС Александр Георгиевич
ХУТСКАЯ Наталия Геннадьевна

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные
технологии и энергетический менеджмент»

Редактор *Е. И. Бенищевич*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 13.10.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,64. Уч.-изд. л. 3,37. Тираж 100. Заказ 549.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.