



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра ЮНЕСКО  
«Энергосбережение и возобновляемые  
источники энергии»

## **ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Лабораторные работы (практикум)  
для студентов технических специальностей

Минск 2005

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра ЮНЕСКО  
«Энергосбережение и возобновляемые источники энергии»

## ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Лабораторные работы (практикум)  
для студентов технических специальностей

Минск 2005

УДК 620.9.004.18 (076.5)

~~ББК 31.19 я 7~~

~~012~~ С - 75

**Составители:**

В.Г. Баштовой, Ю.А. Волков, С.В. Климович,  
Е.К. Костюкевич, Е.В. Кравченко, С.Г. Погирницкая,  
А.Г. Рекс, Н.Г. Хутская, И.В. Янцевич

**Рецензенты:**

В.В. Кулебякин, Г.И. Пальченко

О 12 Основы энергосбережения: лабораторные работы (практикум) для студентов техн. специальностей / Сост.: В.Г. Баштовой [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2005 – 72 с.

В данное издание включены инструкции к лабораторным работам по дисциплине «Основы энергосбережения», а также сведения о некоторых способах преобразования и передачи энергии. Цель практикума - дать наглядное представление о возможностях более эффективного использования энергии в различных областях деятельности человека.

## Содержание

Введение. . . . .	4
<b>Лабораторная работа №1</b> ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ - СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ. . . . .	4
<b>Лабораторная работа №2</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА. . . . .	11
<b>Лабораторная работа №3</b> ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ПО ТРУБОПРОВОДУ. . . . .	17
<b>Лабораторная работа №4</b> ЦИКЛ ТЕПЛОВОГО НАСОСА. . . . .	22
<b>Лабораторная работа №5</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА. . . . .	29
<b>Лабораторная работа №6</b> ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ (сравнительное исследование тепловой трубы). . . . .	35
<b>Лабораторная работа №7</b> ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ . . . . .	42
<b>Лабораторная работа №8</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА НА ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ. . . . .	48
<b>Лабораторная работа №9</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЯ (СВП). . . . .	56
<b>Литература. . . . .</b>	66
<b>Приложение 1. . . . .</b>	67
<b>Приложение 2. . . . .</b>	68
<b>Приложение 3. . . . .</b>	69
<b>Приложение 4. . . . .</b>	71

## Введение

Курс «Основы энергосбережения» включается в образовательные стандарты всех специальностей вузов Министерства образования РБ и является базовой дисциплиной для последующего изучения специальных вопросов эффективного использования энергетических ресурсов в конкретных отраслях народного хозяйства.

Настоящий лабораторный практикум предназначен для проведения лабораторных работ по курсу «Основы энергосбережения» для студентов технических специальностей. Практикум содержит теоретический материал, описание экспериментальных установок и методический материал по выполнению работ и обработке результатов измерений.

Материал практикума охватывает основные методы преобразования световой энергии и энергии ветра в электрическую; основные источники потерь энергии при транспортировке жидкостей и газов по трубопроводу; методы использования низкопотенциального тепла (тепловые насосы); методы более эффективной передачи тепла от одного теплоносителя к другому; методы переноса энергии с помощью тепловой трубы как наиболее эффективной теплопередающей системы; методы преобразования солнечной энергии в тепловую; методы изучения парникового эффекта. Студенты имеют возможность сравнить различные источники света и выбрать наиболее эффективные из них.

Материал практикума построен таким образом, чтобы им могли пользоваться студенты различных технических специальностей с различным уровнем начальной подготовки.

### Лабораторная работа № 1

#### **ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ – СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ**

**Цель работы:** изучить принцип преобразования солнечной энергии в электрическую. Исследовать основные технические характеристики фотоэлектрической батареи.

#### **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 Солнца имеет температуру около 6000 К. Электромагнитным излучением солнечная энергия передается в космическом пространстве 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,  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Для населенных районов в зависимости от места, времени суток и погоды потоки солнечной энергии меняются от 3 до  $30 \text{ МДж/м}^2$  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 10 % и поток солнечной энергии  $17 \text{ МДж/м}^2$  в день, то требуемую для одного человека энергию можно получить со  $100 \text{ м}^2$  площади земной поверхности. При средней плотности населения в городах 500 человек на  $1 \text{ км}^2$  на одного человека приходится  $2000 \text{ м}^2$  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.

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

**Плотность потока излучения (энергетическая освещенность)** – величина, равная отношению потока излучения к площади равномерно облучаемой им поверхности. Единица измерения **плотности потока излучения** –  $\text{Вт/м}^2$ .

Плотность потока излучения от Солнца, падающего на перпендикулярную ему площадку вне земной атмосферы, называется **солнечной константой**  $S$ , которая равна  $1367 \text{ Вт/м}^2$ .

**Световой поток.** Световым потоком называется поток излучения, оцениваемый 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. 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). Световой поток в 1 лм белого света равен  $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$  (или  $1 \text{ Вт} = 217 \text{ лм}$ ).

**Освещенность** – величина, равная отношению светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности. Освещенность измеряется в **люксах** (лк).  $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$ . Для белого света  $1 \text{ лк} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$  (или  $1 \text{ Вт/м}^2 = 217 \text{ лк}$ ).

Приборы, предназначенные для измерения освещенности, называются **люксметрами**.

## Освещенность, создаваемая различными источниками

Источники	Освещенность, лк	Освещенность, Вт/м <sup>2</sup>
Солнечный свет в полдень (средние широты)	100000	460
Солнечный свет зимой	10000	46
Облачное небо летом	5000–20000	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	$0,92 \cdot 10^{-3}$

В связи с большим потенциалом солнечной энергии чрезвычайно заманчивым является максимально возможное непосредственное 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 использовании такого физического явления, как фотоэффект.

**Фотоэффектом** называются электрические явления, происходящие при освещении вещества светом, а именно: 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**).

При освещении границы раздела полупроводников с различными типами проводимости (p-n) между ними устанавливается разность потенциалов (фото-ЭДС). Это явление называется **вентильным фотоэффектом**, и на его использовании основано создание фотоэлектрических преобразователей энергии (солнечных элементов и батарей).

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. Кремниевые солнечные элементы имеют коэффициент преобразования 10-15% (т.е. при освещенности 1 кВт/м<sup>2</sup> вырабатывают электрическую мощность 1-1,5 Вт) при создаваемой разности потенциалов около 1 В.

Типичная структура солнечного элемента с р-п-переходом изображена на рис. 1.1 и включает в себя: 1 – слой полупроводника (толщиной 0,2–1,0 мкм) с n-проводимостью; 2 – слой полупроводника (толщиной 250–400 мкм) с p-проводимостью; 3 – добавочный потенциальный барьер (толщиной 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 размер солнечного элемента 10 см.

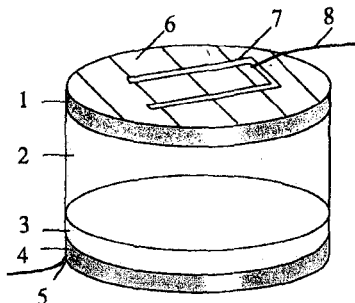


Рис. 1.1. Структура солнечного элемента

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

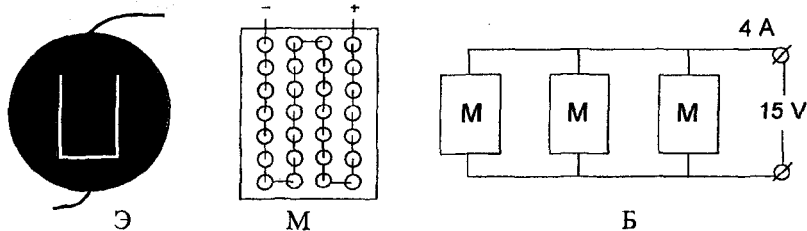


Рис. 1.2. Э – солнечный элемент; М – солнечный модуль;  
Б – солнечная батарея

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 аппараты, работающие на солнечных батареях.

Основные компоненты солнечной энергетической установки изображены на рис. 1.3 и включают в себя: Б – солнечную батарею с приборами контроля и управления; А – аккумуляторную батарею; И – инвертор для преобразования по-



стоянного тока солнечной батареи в переменный ток промышленных параметров, потребляемый большинством электрических устройств.

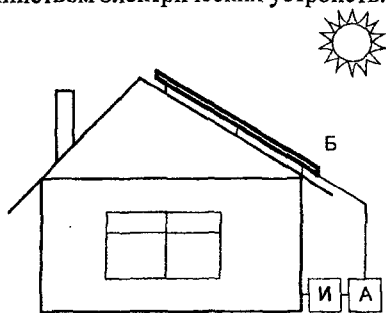


Рис. 1.3. Солнечная энергетическая установка

Несмотря на неравномерность суточного потока солнечного излучения и его отсутствие в ночное время, аккумуляторная батарея, накапливая вырабатываемое солнечной батареей электричество, позволяет обеспечить непрерывную работу солнечной энергетической установки.

Экспериментальная установка (рис. 1.4) включает в себя: 1 – солнечный модуль, состоящий из 36-ти (9×4) солнечных элементов; 2 – амперметр и 3 – вольтметр для определения напряжения и силы тока, вырабатываемых солнечным модулем; 4 – источник света, имитирующий солнечное излучение; 5 – люксметр для определения освещенности поверхности солнечного модуля; 6 – реостат, представляющий собой регулируемую нагрузку в электрической цепи.

#### Экспериментальная установка

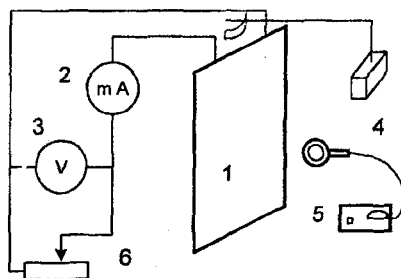


Рис. 1.4. Схема экспериментальной установки

#### Порядок выполнения работы

- а). Исследование характеристик холостого хода солнечного элемента.
1. Удостовериться, что нагрузка на солнечный модуль отсоединена.

2. Измерить ширину  $a$  (м) и высоту  $b$  (м) рабочей поверхности солнечного модуля и определить ее площадь  $S = ab$ , м<sup>2</sup>.
3. Установить источник света на прямое излучение на поверхность солнечного модуля (нулевая отметка на лимбе источника).
4. Включить источник света.
5. Люксметром измерить освещенность в центре и четырех крайних точках поверхности солнечного модуля ( $E_{ц}$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$ ) и определить ее среднее значение ( $E_{ср}$ ), полученные результаты занести в табл. 1.1.
6. По показаниям вольтметра определить ЭДС, вырабатываемую солнечным модулем при положении источника света – 0 градусов по лимбу.
7. Провести аналогичные измерения при косом падении излучения на поверхность модуля, поворачивая источник света на 10, 20, 30, 40, 50 градусов по лимбу.
8. Определить плотность потока излучения  $E_{эн}$  (энергетическую освещенность), используя соотношения между лк и Вт/м<sup>2</sup>; для белого света  $E_{эн} = 4,6 \cdot 10^{-3} E_{ср}$ .
9. Определить поток излучения  $\Phi_{изл}$ , из определения плотности потока излучения  $E_{эн}$  следует  $\Phi_{изл} = E_{эн} S$  Вт, полученный результат занести в табл. 1.2.
10. Определить ЭДС-1 – ЭДС, вырабатываемая одним солнечным элементом, равная отношению ЭДС на количество элементов, из которых состоит солнечный модуль: Полученные результаты занести в табл. 1.1.
11. Построить график зависимости ЭДС солнечного модуля от плотности потока излучения, падающего на его поверхность  $E_{эн}$ .

Таблица 1.1

## Результаты измерений и вычислений

Угол падения излучения, градус	$E_{ц}$ , лк	$E_1$ , лк	$E_2$ , лк	$E_3$ , лк	$E_4$ , лк	$E_{ср}$ , лк	ЭДС, В	$E_{эн}$ , Вт/м <sup>2</sup>	ЭДС-1, В
0									
10									
20									
30									
40									
50									

- б). Определение вольтамперной характеристики солнечного модуля.
  1. Подключить нагрузку (реостат) к цепи солнечного элемента.
  2. Установить источник света на прямое излучение на поверхность солнечного модуля (нулевая отметка на лимбе источника).
  3. Включить источник света. По показаниям вольтметра определить напряжение в цепи  $U$ . По показаниям амперметра определить ток в цепи  $I$ .
  4. Перемещая подвижный контакт реостата, изменить сопротивление нагрузки в цепи и выполнить измерения  $U$  и  $I$ . Провести измерения 6 раз в пределах от минимального до максимального значения сопротивления нагрузки.

5. Для каждого измерения вычислить электрическую мощность в цепи  $N=I \cdot U$ .

6. Все данные занести в табл. 1.2.

7. Построить вольтамперную характеристику (график зависимости  $I$  от  $U$ ) солнечного модуля при данной плотности потока излучения, значение которой взять из предыдущей серии измерений.

8. Отметить наибольшее значение мощности ( $N_{\max}$ ), вырабатываемой солнечным модулем и рассчитать коэффициент преобразования (см. таблицу).

Таблица 1.2

Результаты измерений и вычислений

Плотность потока излучения $E_{\text{эл}}$ Вт/м <sup>2</sup>			
Поток излучения $\Phi_{\text{эл}}$ Вт			
№ измерения	Напряжение $U$ , В	Ток $I$ , А	Мощность $N$ , Вт
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
Коэффициент преобразования		$\frac{N_{\max}}{\Phi_{\text{эл}}} 100\%$	

Контрольные вопросы по лабораторной работе № 1

1. Цель лабораторной работы и объект исследования.
2. Основные величины, характеризующие солнечное излучение.
3. Какова температура поверхности Солнца?
4. Каким образом энергия Солнца достигает поверхности Земли?
5. Поток излучения, единицы измерения.
6. Плотность потока излучения, единицы измерения.
7. Световой поток, единицы измерения.
8. Освещенность, единицы измерения освещенности. Приборы для измерения освещенности.
9. На каком явлении основано действие фотоэлектрических преобразователей энергии?
10. Фотозффект, виды фотозффекта.
11. Физический смысл коэффициента преобразования солнечной энергии в электрическую.
12. Какие основные компоненты должна содержать солнечная энергетическая установка?
13. Области применения солнечных батарей.

14. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.
15. Методика исследования характеристики холостого хода солнечного элемента.
16. Как зависит ЭДС солнечного модуля от плотности потока излучения, падающего на его поверхность?
17. Методика определения вольтамперной характеристики солнечного модуля.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

**Цель работы** состоит в изучении устройства, принципа действия и сравнении основных параметров наиболее распространенных типов электрических источников света.

#### Общие сведения

Свет представляет собой электромагнитные волны длиной  $4 \cdot 10^{-7} \div 8 \cdot 10^{-7}$  м. Электрические волны излучаются при ускоренном движении заряженных частиц. Для того чтобы атом или молекула начали излучать, им необходимо передать определенное количество энергии. Излучая, они теряют полученную энергию, поэтому для непрерывного свечения необходим постоянный приток энергии извне.

**Поток излучения,  $\Phi_{\text{изл}}$**  – энергия, переносимая электромагнитными волнами за 1 секунду через произвольную поверхность. Единица измерения потока излучения Дж/с = Вт.

**Энергетическая освещенность,  $E_{\text{эн}}$**  (плотность потока излучения) – отношение потока излучения к площади равномерно облучаемой им поверхности. Единица измерения энергетической освещенности Вт/м<sup>2</sup>.

**Световой поток,  $\Phi$**  – поток излучения, оцениваемый по его воздействию на человеческий глаз. Человеческий глаз неодинаково чувствителен к потокам света с различными длинами волн (наиболее чувствителен глаз при дневном освещении к свету с длиной волны 555 нм). Единицей измерения светового потока с точки зрения восприятия его человеческим глазом (яркости) является люмен (лм). Световой поток в 1 лм белого света равен  $4,6 \cdot 10^3$  Вт (1 Вт = 217 лм).

**Освещенность,  $E$**  – отношение светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности. Измеряется в люксах (лк), где люкс – освещенность, при которой на 1 м<sup>2</sup> поверхности равномерно распределен световой поток в 1 люмен.

Освещенность поверхности прямо пропорциональна световому потоку и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника.

**Тепловое излучение** – электромагнитное излучение тела, обусловленное возбуждением атомов или молекул тела вследствие их теплового движения. Чем

выше температура тела, тем быстрее движутся атомы или молекулы. При столкновении друг с другом часть их кинетической энергии превращается в энергию возбуждения, которая затем превращается в световую.

**Люминесцентное излучение** связано с переходом излучающих атомов, молекул и ионов в возбужденное состояние и последующим их возвращением в нормальное или менее возбужденное состояние, сопровождающееся испусканием света (избыточное над тепловым при той же температуре). Это излучение может быть вызвано бомбардировкой вещества электронами и другими заряженными частицами, пропусканием через вещество электрического тока, освещением вещества, видимым светом, рентгеновским и гамма-излучением, а также некоторыми химическими реакциями в веществе. Вещества, в которых происходит люминесценция, называются *люминофорами*.

### **Электрические источники света, их конструкции и параметры**

Электрические источники света по способу генерирования ими излучения делятся на температурные (лампы накаливания) и люминесцентные (люминесцентные и газоразрядные лампы).

Принцип действия **ламп накаливания** основан на вышеописанном тепловом излучении. Лампа накаливания - электрический источник света с излучателем в виде накаливаемой током проволоки (нити) из тугоплавкого материала. Нить накала изготавливают из вольфрама, обладающего высокой температурой плавления и малой скоростью испарения при высоких температурах. Для предотвращения окисления раскаленной нити лампы откачивают до  $10^{-4}$  -  $10^{-6}$  мм рт. ст. (вакуумные лампы).

Основные недостатки ламп накаливания:

- низкий КПД (около 2 %), так как подавляющая часть потребляемой электроэнергии этими лампами преобразуется не в световую, а в тепловую энергию;
- низкий срок службы, который в среднем составляет около 1000 часов, ограничиваемый сроком службы спирали, которая работает при больших температурах. Срок службы ламп накаливания снижается при их вибрациях, частых включениях и отключениях, не вертикальном положении.

Кроме того, свет ламп накаливания отличается от естественного преобладанием лучей желто-красной части спектра, что искажает естественную расцветку предметов.

Несмотря на указанные недостатки, в настоящее время лампы накаливания все еще находят широкое распространение в связи с их простотой в эксплуатации, надежностью, компактностью и низкой стоимостью.

Лампы накаливания могут быть *вакуумными*, *газонаполненными* и *галогенными*. В *газонаполненных лампах*, заполняют инертным газом до давления, близкого к атмосферному, в составе газового заполнения колбы используются малотеплопроводные, инертные газы (аргон, криптон, ксенон) с примесью 5 -- 15% азота.

**Галогенные лампы** являются разновидностью ламп накаливания, основное отличие которых заключается в повышенном сроке службы, как правило, до 2000 часов. Это достигается за счет того, что в состав газового заполнения колбы галогенной лампы накаливания добавляется йод, который при определенных условиях обеспечивает обратный перенос испарившихся частиц вольфрама спиралей со стенок колбы лампы на тело накала.

**Люминесцентная лампа** - искусственный источник света, основанный на двойном преобразовании энергии — превращении электрической энергии в энергию ультрафиолетового излучения и ультрафиолетового излучения в видимое свечение люминесцирующих веществ. По сравнению с лампами накаливания люминесцентная лампа обладает существенными преимуществами: в несколько раз большей экономичностью; резко улучшенными цветовыми свойствами и повышенным сроком службы.

Люминесцентная лампа представляет собой стеклянную трубку, наполненную парами ртути и аргоном, с нанесенным на внутреннюю поверхность люминесцирующих вещества. В оба конца трубки впаяны электроды в виде вольфрамовых спиралей; они покрыты оксидной пастой (смесь окислов бария, стронция и кальция), облегчающей выход электронов. При работе на переменном токе электроды поочередно служат катодом и анодом и нагреваются разрядом. При этом работает лишь небольшая часть катода (катодное пятно). Излишний нагрев электродов в анодный полу период снижается приваренными к ножкам электродов никелевыми отрезками, которые принимают на себя более половины разрядного тока.

Давление ртутных паров благодаря наличию избытка жидкой ртути зависит от температуры стенок лампы. При нормальной температуре (40°C) оно составляет около  $10^{-2}$  мм рт. ст.; давление аргона около 4 мм рт. ст. Существенную роль в установлении нормальной температуры стенок играет внешняя температура которая должна быть 18—25°C. При низких внешних температурах люминесцентная лампа нуждается в теплоизоляции. Нормальная температура стенок лампы достигается через несколько минут после включения (*время прогрева*), и тогда только устанавливается стабильное значение светового потока.

При работе люминесцентной лампы электрический ток в несколько десятых долей, проходит между электродами сквозь газовую среду, возбуждая свечение паров ртути. Аргон не возбуждается, но улучшает условия возбуждения паров ртути и замедляет разрушение электродов. Ртутные пары при низких давлениях и малом токе испускают главным образом ультрафиолетовое излучение. Видимое свечение люминофора возбуждается ультрафиолетовым излучением и составляет основную часть светового потока люминесцентной лампы. Его спектральный состав зависит от состава люминофора и может быть любым. В излучении люминесцентной лампы общего освещения значительно усилена желто-зеленая часть спектра, к которой особенно чувствителен человеческий глаз. В основных типах люминесцентных ламп применяется смесь обычно двух люминофоров: вольфрамит магния (голубое свечение) и цинк-бериллий силиката (оранжевое свечение). В зависимости от типа люминофора и пропорции смеси изготавливаются люминесцентной лампы дневного света, холодно-белого света,

белого света и тепло-белого света, а также солнечного света, дающие не только видимое, но и ультрафиолетовое излучение, и специальные люминесцентные лампы, дающие ультрафиолетовое излучение.

Экономичность источника света (лампы) оценивают **световой отдачей** – значением светового потока, приходящегося на единицу мощности лампы (лм/Вт).

Светоотдача люминесцентной лампы в 34 раза выше, чем у ламп накаливания и зависит от длины трубки и спектрального состава излучения. В нормальных эксплуатационных условиях срок службы люминесцентной лампы около 3000 часов (в 3 раза больше, чем у ламп накаливания).

Основные недостатки люминесцентной лампы:

- величина светового потока периодически изменяется с частотой, равной удвоенной частоте питающего тока
- появляющийся стробоскопический эффект
- необходимость специального светильника
- в результате старения люминофоров световой поток после 2000—2500ч горения снижается ~ на 30%. Причинами, снижающими срок службы люминесцентной лампы, являются колебания напряжения в сети, питающей люминесцентные лампы, и большое число включений, при которых особенно разрушаются электроды.

### Экспериментальная установка

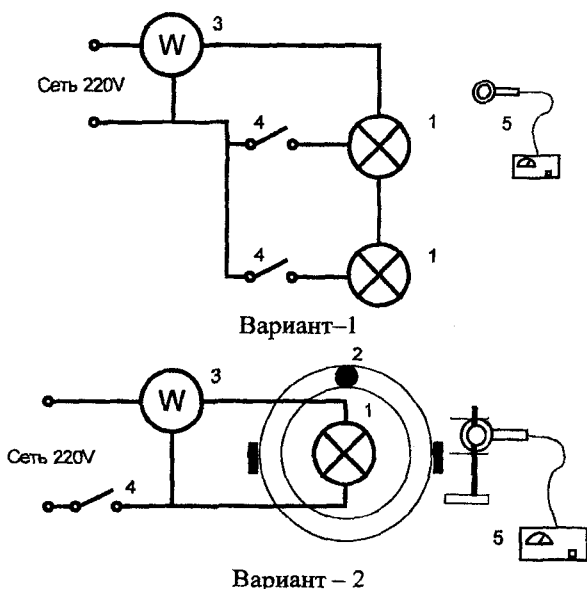


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки.

Экспериментальная установка (рис. 2.1) включает в себя: 1 – светильник с лампой (накаливания или люминесцентной, работающей с частотой от 12500-35000 Гц); 2 – поворотный стол; 3 – ваттметр для измерения потребляемой лампами из сети электрической мощности; 4 – выключатели; 5 – прибор для измерения освещенности люксметр.

### Порядок выполнения работы

#### Вариант –1

1. Установить необходимый диапазон измерений люксметра.
2. Включить лампу накаливания. Люксметром 4 измерить величину освещенности в 5 точках на поверхности включенного светильника.
3. По ваттметру 2 определить величину мощности  $N$ , потребляемой лампой накаливания.
4. Выключить лампу накаливания.
5. Включить люминесцентную лампу и произвести для нее аналогичные измерения.
6. Измерить диаметр  $d$  и высоту  $h$  цилиндрического светильника и определить площадь его поверхность  $S = \frac{\pi d^2}{4} + \pi dh$ , м<sup>2</sup>.
7. Полученные данные занести в табл. 2.1.
8. По результатам расчетов сделать вывод об экономичности рассмотренных источников света и целесообразности их использования.

#### Вариант –2

1. Установить необходимый диапазон измерений люксметра.
2. Установить поворотный стол по отметкам 0.
3. Направление тубус на штативе выставить на среднюю область лампы.
4. Включить лампу выключателем 3. Люксметром 4 измерить величину освещенности на поверхности включенного светильника при данном положении стола.
5. Изменить положение светильника на поворотном столе по горизонтали на необходимый угол (45, 90, 120, 160°) и измерить величину освещенности при данных углах.
6. По ваттметру 2 определить величину мощности  $N$ , потребляемой лампой.
7. Выключить лампу.
8. После остывания лампы, заменить ее лампой другого типа.
9. Повторить измерения.
10. Измерить диаметр  $d$  (м) и высоту  $h$  (м) цилиндрического светильника и определить его поверхность  $S = \frac{\pi d^2}{4} + \pi dh$ , м<sup>2</sup>.
11. Полученные данные занести в табл. 2.1.
12. По результатам расчетов сделать вывод об экономичности рассмотренных источников света и целесообразности их использования.



Таблица 2.1

Параметры	Включенный электрический источник света		
	лампа накаливания	люминесцентная лампа, частота 12000 Гц	люминесцентная лампа, частота 35000 Гц
Потребляемая мощность $N$ , Вт			
Освещенность $E$ на поверхности светильника, в точках, лк	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
Расчетное значение освещенности $\bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5}{5}$ , лк			
Расчетное значение светового потока $\Phi = \bar{E} \cdot S$ , лм			
Поток излучения $\Phi_{изл} = \frac{\Phi}{217}$ , Вт			
КПД источника света $\eta = \frac{\Phi_{изл}}{N} \cdot 100 \%$			
Плотность потока излучения (энергетическая освещенность) $E_{эн} = \frac{\Phi_{изл}}{S}$ , Вт/м <sup>2</sup>			
Светоотдача источника света, $C = \frac{\Phi}{N}$ , лм/Вт			

### Контрольные вопросы по лабораторной работе № 2

1. Цель лабораторной работы и объект исследования.
2. Что собой представляет свет?
3. Поток излучения, единицы измерения.
4. Плотность потока излучения (энергетическая освещенность), единицы измерения.
5. Световой поток, единицы измерения.
6. Освещенность, единицы измерения. Приборы для измерения освещенности.
7. От каких величин зависит освещенность?
8. Тепловое излучение. От какого вида источников оно получается?
9. Люминесцентное излучение. От какого вида источников оно получается?

10. Основные виды электрических источников света.
11. Принцип действия ламп накаливания. Основные недостатки и достоинства ламп накаливания.
12. Конструкция и принцип действия люминесцентной лампы.
13. С помощью каких характеристик можно сравнивать эффективность различных источников света?
14. КПД источников света.
15. Почему лампы накаливания менее эффективны по сравнению с люминесцентными лампами?
16. Какой источник света является наиболее экономичным и целесообразным для использования и почему?
17. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.
18. Порядок выполнения работы.

### Лабораторная работа №3

#### ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ ПО ТРУБОПРОВОДУ

**Цель работы:** экспериментальное определение потерь энергии на транспортирование жидкостей и газов по сложному трубопроводу, включающему в себя магистральный трубопровод и участки с резким изменением геометрии потока.

#### Общие сведения

Транспортирование текучих сред (жидкостей и газов) по трубопроводам осуществляется с помощью нагнетательных устройств (насосов, вентиляторов и т.п.). Для того чтобы перемещать текучую среду, нагнетательное устройство должно затрачивать некоторую энергию. Оказывается, эта энергия зависит не только от физических свойств текучей среды, но и от характеристик трубопроводной системы. Эксплуатационные расходы энергии на транспортирование можно существенно сократить за счет выбора оптимальной геометрии трубопроводной системы, что может быть реализовано только после изучения основных закономерностей течения жидкостей и газов по трубопроводам.

Поток жидкости либо газа можно характеризовать *объемным расходом*  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) и средней по сечению трубы *скоростью*  $v$  ( $\text{м}/\text{с}$ ). Расход является одной из основных характеристик потоков жидкости либо газа. *Расходом* называется количество жидкости или газа, которое перемещается через поперечное сечение трубопровода в единицу времени. Объемный расход и скорость, связаны между собой соотношением

$$Q = vS, \tag{3.1}$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения трубы,  $\text{м}^2$ .

При движении реальных жидкостей и газов часть механической энергии движения необратимо превращается в тепловую. Эта часть энергии называется *потерей энергии*  $\Delta E$ . Потери энергии обусловлены существованием сил вязкого трения в жидкостях и газах, т.е. вязкости. С потерями энергии связаны *потери давления*, которые находим как

$$\Delta p_{\text{пот}} = \rho \Delta E,$$

и *потери напора*, которые определяются как

$$\Delta h_{\text{пот}} = \Delta p_{\text{пот}} / \rho g = \Delta E / g,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости либо газа,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Потери давления  $\Delta p_{\text{пот}}$  измеряются в Па, потери напора  $\Delta h_{\text{пот}}$  в м.

Существование сил вязкости приводит к затратам энергии на перемещение текучих сред. Часть мощности, затрачиваемая нагнетательным устройством на транспортирование по трубопроводу текучих сред с расходом  $Q$ , определяется выражением

$$N = \Delta p_{\text{пот}} Q, \text{ Вт.}$$

Гидравлические потери давления (напора) обычно делят на два вида. Первый вид представляет собой *потери давления на трение*  $\Delta p_{\text{тр}}$  при стабилизированном движении жидкости в длинных трубах. Эти потери равномерно распределяются по всей длине трубы. Потери второго вида ( $\Delta p_{\text{м}}$ ) сосредоточены на сравнительно коротких участках трубопроводов и вызываются местными изменениями конфигурации канала. Эти сопротивления называются *местными*. Примерами местных сопротивлений могут служить участки резкого расширения и сужения трубопровода, места слияния и разделения потоков, различного рода трубопроводная аппаратура (вентили, клапаны, задвижки, дроссели и т.п.). Характерной особенностью движения жидкости через местные сопротивления является образование вихрей в потоке, что вызывает значительные потери энергии (давления, напора).

Таким образом, полные потери давления и напора определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{пот}} &= \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}}, \\ \Delta h_{\text{пот}} &= \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{м}}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Потери напора по длине для случая установившегося движения жидкости по трубопроводу круглого сечения определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l V^2}{d 2g},$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения (коэффициент потерь напора по длине);

$l$  – длина рассматриваемого участка трубы, м;

$d$  – диаметр трубопровода, м;

$v$  – средняя скорость движения жидкости, м/с.

Из формулы Дарси-Вейсбаха видно, что величина потерь напора на гидравлическое трение по длине возрастает с увеличением скорости потока и длины трубы и уменьшается с увеличением диаметра трубопровода.

Местные потери напора определяются по формуле

$$\Delta h_m = \zeta \frac{V^2}{2g},$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  зависит от режима течения жидкости и шероховатости трубы. Эта зависимость называется *законом сопротивления*.

Коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  также зависит от режима течения и от вида и конструктивного исполнения местного сопротивления.

Сравнительный анализ различных гидравлических сопротивлений показывает, что потери энергии значительно возрастают при резком изменении диаметра трубы, при резких поворотах и т.п.

Значения коэффициентов сопротивления, как правило, определяются опытным путем и в обобщенном виде содержатся в справочниках в виде эмпирических формул, таблиц, графиков. В приложении к работе приведены некоторые данные по гидравлическим сопротивлениям.

**Основные методы снижения потерь энергии** при транспортировании жидкостей и газов по сложным трубопроводам:

- использование труб с гладкой внутренней поверхностью;
- обеспечение плавных поворотов потока;
- устройство более плавного изменения поперечного сечения потока жидкости;
- устройство плавных входов и выходов из труб;
- разогрев при перекачивании высоковязких жидкостей;
- введение полимерных добавок в поток жидкости.

### Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 3.1. Вода из напорного бака 1 проходит последовательно через входной вентиль 2, магистральный трубопровод 3, участки трубопровода с резким 4 и плавным 5 поворотами, резким расширением 6 и резким сужением 7, диафрагму 8 и сливается в бак 10. Расход воды регулируется вентилем 9 и определяется по перепаду давления на диафрагме 8 с помощью тарировочного графика. Уровень в баке 1 поддерживается постоянным, с помощью насоса 11.

Пьезометрический напор в жидкости на различных участках трубопровода определяется по показаниям пьезометрических трубок  $h_1 - h_{10}$ , выведенных на общий щит и установленных на исследуемых участках трубопровода.

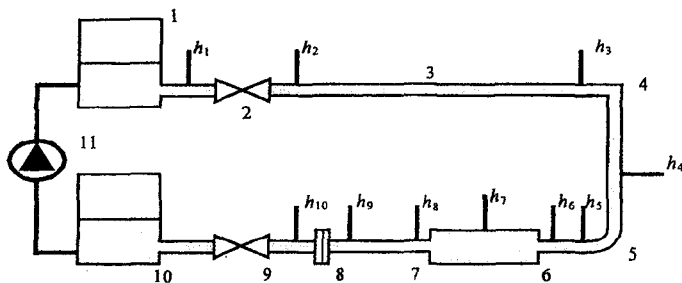


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки.

Диаметр магистрального участка трубопровода  $d = 1,6 \cdot 10^{-2}$  м; плотность воды –  $1000 \text{ кг/м}^3$

### Порядок выполнения работы

1. Включить насос 11 и заполнить напорный бак 1.
2. Открыть вентиль 2 полностью и с помощью вентиля 9 установить заданное значение расхода воды. Величина расхода  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) определяется по разности  $\Delta h_{9,10}$  показаний пьезометров  $h_9$  и  $h_{10}$  ( $\Delta h_{9,10} = h_9 - h_{10}$ ) и тарифовочному графику.
3. При данном значении расхода снять показания всех пьезометров, данные занести в табл. 3.1.
4. Изменить расход жидкости и при каждом значении расхода снять показания всех пьезометров, данные занести в табл. 3.1. После выполнения работы закрыть вентили 2 и 9 и отключить насос.

Таблица 3.1

№ опыта	Показания пьезометров									
	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_3$ , мм	$h_4$ , мм	$h_5$ , мм	$h_6$ , мм	$h_7$ , мм	$h_8$ , мм	$h_9$ , мм	$h_{10}$ , мм
1										
2										
3										

### Обработка экспериментальных данных

1. Определить потери напора на отдельных участках трубопровода, например,  $\Delta h_{1,2} = h_1 - h_2$ . Данные занести в табл. 3.2.
2. По перепаду напора на диаграмме  $h_{9,10} = h_9 - h_{10}$  с помощью тарифовочной кривой (Приложение 1) определить расход воды для всех 7 опытов. Данные занести в табл. 3.2.

3. Определить среднюю скорость воды в трубопроводе

$$V = 4Q/\pi d^2, \text{ м/с}, \quad (3.3)$$

где  $d$  – диаметр магистрального участка трубопровода и  $d = 1,6 \cdot 10^{-2}$  м;

4. Для каждого значения скорости потока вычислить потери напора по длине  $\Delta h_{\text{пот}}$ , например,  $\Delta h_{2,3} = h_2 - h_3$  и на отдельных участках трубопровода (местных сопротивлениях) в соответствии с табл. 3.2.

Таблица 3.2

№ опыта		1	2	3
Объемный расход	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$			
Средняя скорость	$V, \text{ м/с}$			
Входной вентиль	$\Delta h_{1,2}, \text{ м}$			
	$N_{1,2}, \text{ Вт}$			
Магистральный трубопровод	$\Delta h_{2,3}, \text{ м}$			
	$N_{2,3}, \text{ Вт}$			
Резкий поворот на $90^\circ$	$\Delta h_{3,4}, \text{ м}$			
	$N_{3,4}, \text{ Вт}$			
Плавный поворот на $90^\circ$	$\Delta h_{4,5}, \text{ м}$			
	$N_{4,5}, \text{ Вт}$			
Резкое расширение	$\Delta h_{6,7}, \text{ м}$			
	$N_{6,7}, \text{ Вт}$			
Резкое сужение	$\Delta h_{7,8}, \text{ м}$			
	$N_{7,8}, \text{ Вт}$			
Диафрагма	$\Delta h_{9,10}, \text{ м}$			
	$N_{9,10}, \text{ Вт}$			

5. Мощность, затрачиваемая на преодоление каждого из гидравлических сопротивлений, определяется по формуле

$$N = \rho g \Delta h_{\text{пот}} Q, \quad (3.4)$$

где  $\rho$  – плотность воды  $1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения  $9,8 \text{ м/с}^2$ ;

$\Delta h_{\text{пот}}$  – потери напора по длине на данном участке трубопровода;

$Q$  – объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

6. Провести сравнительный анализ потерь энергии на каждом из участков сложного трубопровода. Обратит внимание на влияние скорости течения на потери энергии.

### Контрольные вопросы по лабораторной работе № 3

1. Цель лабораторной работы и объект исследования.
2. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.
3. Какие величины характеризуют поток жидкости или газа?
4. Какие устройства используются для перекачивания жидкостей и газов?
5. Расход жидкости. Единицы измерения объемного расхода. Зависимость объемного расхода от скорости.

6. Чем обусловлены потери энергии при транспортировании жидкостей в трубопроводах?
7. Виды гидравлических потерь.
8. Виды местных сопротивлений.
9. Как определить мощность, затрачиваемую на транспортирование текучих сред по трубопроводу?
10. Как зависят потери энергии от скорости потока, длины и диаметра трубопровода? Влияние качества поверхности труб, их геометрии на потери энергии.
11. Основные методы снижения потерь энергии при транспортировании жидкостей и газов.

## **Лабораторная работа № 4**

### **ЦИКЛ ТЕПЛООВОГО НАСОСА**

**Цель работы:** Изучение цикла теплового насоса. Определение отопительного коэффициента цикла  $\varepsilon$ . Определение количества низкопотенциальной теплоты  $Q_2$ , отбираемой у окружающей среды. Определение количества теплоты  $Q_1$ , передаваемой в систему отопления помещения.

#### **Общие сведения**

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

**Тепловой насос** – установка, при помощи которой осуществляется перенос энергии в форме теплоты, от более низкого к более высокому температурному уровню, необходимому для теплоснабжения.

Независимо от типа теплового насоса и типа привода компрессора на единицу затраченного исходного топлива потребитель получает по крайней мере в 1,1–2,3 раза больше тепла, чем при прямом сжигании топлива.

Такая высокая эффективность производства тепла достигается тем, что тепловой насос вовлекает в полезное использование низкопотенциальное тепло естественного происхождения (тепло грунта, природных водоемов, грунтовых вод) и техногенного происхождения (промышленные стоки, очистные сооружения, вентиляция и т.д.) с температурой от +3 до +40 °С, т.е. такое тепло, которое не может быть напрямую использовано для теплоснабжения.

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

Согласно прогнозам Мирового энергетического комитета (МИРЭК) к 2020 г. 75 % теплоснабжения (коммунального и производственного) 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 и зимой морскую воду с температурой 4 °С, охлаждая ее до 2 °С. Себестоимость тепла от этой установки на 20 % ниже себестоимости тепла, получаемого от газовой котельной. Общее количество тепла, вырабатываемого тепло насосными установками в Швеции, составляет около 50 % от потребного.

Результатом работы всякого холодильного цикла является охлаждение холодного источника и нагрев горячего за счет подвода внешней работы. Кельвин (1852 г.) предложил применить обратный цикл для целей отопления, используя его в качестве теплового насоса, который перекачивал бы теплоту, отобранную от холодного источника (внешней среды) в горячий.

Введем следующие обозначения:

$q_2$  – удельная теплота, отбираемая от холодного источника, кДж/кг (низкопотенциальная теплота);

$q_1$  – удельная теплота (теплота, приходящаяся на единицу массы), передаваемая горячему источнику, кДж/кг (теплота, передаваемая в систему отопления помещения);

$l_{\text{цикла}}$  – удельная работа, подводимая от внешнего источника, кДж/кг.

Можно записать

$$q_1 = q_2 + l_{\text{цикла}}; \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{q_1}{l_{\text{цикла}}}, \quad (4.2)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент преобразования или отопительный коэффициент цикла. Этот коэффициент характеризует эффективность цикла теплового насоса.

Рабочий цикл теплового насоса представлен на рис. 4.1.



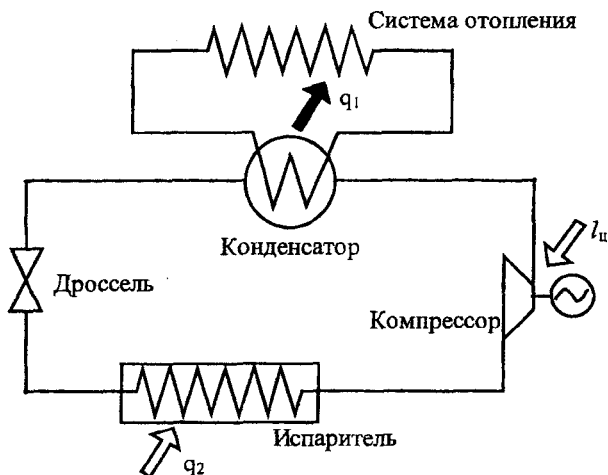


Рис. 4.1. Рабочий цикл теплового насоса

Низко потенциальная теплота  $Q_2$  поступает в испаритель теплового насоса, где ее воспринимает рабочее тело (хладагент), циркулирующее в цикле. Источником низко потенциальной 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  $I_{цикл}$ . 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 температуре. Жидкий хладагент поступает в дроссель, где его давление падает до давления в испарителе, а температура снижается до температуры низко потенциального источника. Цикл замыкается.

## Экспериментальная установка

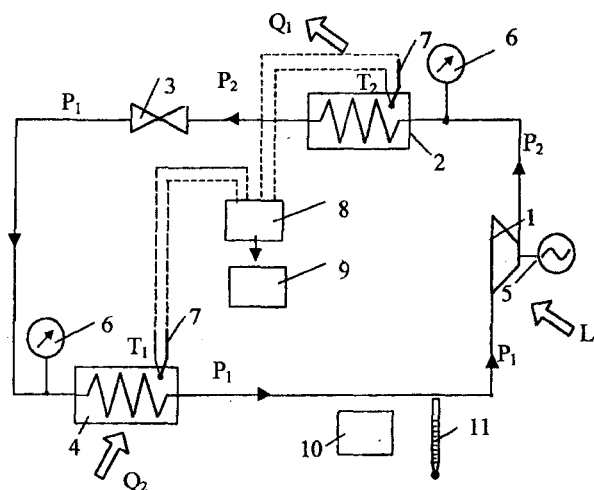


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка включает в себя: 1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – дроссельный вентиль; 4 – испаритель; 5 – электродвигатель; 6 – манометры; 7 – хромель-копелевые термопары; 8 – переключатель термопар; 9 – милливольтметр; 10 – барометр; 11 – термометр.

### Порядок выполнения работы

1. Включить установку в сеть.
2. Дождаться выхода работы установки на стационарный режим, о котором свидетельствует неизменность показаний манометров.
3. Измерить при помощи манометров давление за компрессором и за дроссельным вентилем перед испарителем. Результаты занести в табл. 4.1.
4. С помощью барометра измерить атмосферное давление барометром  $B$ , Па. Результаты занести в табл. 4.1.
5. Измерить температуру окружающей среды термометром  $t_{oc}$ , °C. Результаты занести в табл. 4.1.
6. При помощи термопар и милливольтметра измерить температуры в конденсаторе и испарителе в милливольтмах и, пользуясь градуировочной таблицей (Приложение 2), перевести их в градусы Цельсия с учетом поправки на холодный спай термопар (к табличному значению температуры в °C прибавить температуру окружающей среды). Результаты занести в табл. 4.1.
7. Выключить установку из сети.

$P_{1\text{мвн}}$ ати	$P_{2\text{мвн}}$ ати	$B$ , Па	$P_1$ , МПа	$P_2$ , МПа	$t_1$ , мВ	$t_2$ , мВ	$t_{0\text{с}}$ , °С	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С

Рассмотренный цикл теплового насоса в  $T, s$ -диаграмме выглядит следующим образом (рис. 4.3). Координаты  $T$  – абсолютная температура,  $K$ ;  $s = dq/T$  – удельная энтропия – термодинамический параметр состояния,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

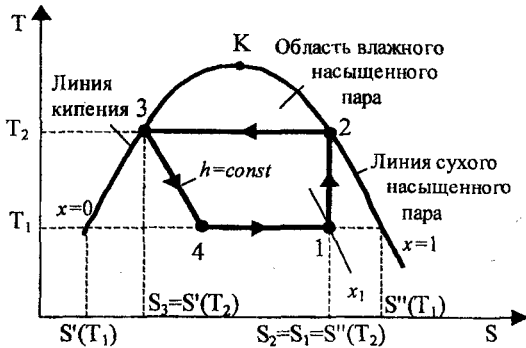


Рис. 4.3. Цикл теплового насоса:

- 1-2 – адиабатное сжатие хладагента в компрессоре; 2-3 – отвод теплоты из конденсатора в систему отопления помещения ( $P_2 = \text{const}$ ,  $t_2 = \text{const}$ ); 3-4 – дросселирование; 4-1 – подвод низкопотенциальной теплоты из окружающей среды к испарителю ( $P_1 = \text{const}$ ,  $t_1 = \text{const}$ ).

В таблице термодинамических свойств хладагента (фреона-12) (Приложение 3) параметры на линии кипения (нижней пограничной кривой) обозначены параметрами с одним штрихом; на линии сухого насыщенного пара (верхней пограничной кривой) – с двумя штрихами. Между линиями кипения и сухого насыщенного пара находится область влажного насыщенного пара.

**Степень сухости влажного насыщенного пара ( $x$ )** – отношение массы сухого насыщенного пара к массе влажного насыщенного пара. Значение  $x$  изменяется от 0 (кипящая жидкость) до 1 (сухой насыщенный пар).

По полученным значениям температур  $t_1$  и  $t_2$  заполняется табл. 4.2.

Параметры	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
Температура				
$t_1$				
$t_2$				

Величина  $h$  – удельная энтальпия,  $s$  – удельная энтропия – термодинамические параметры состояния.

### Методика расчета

Манометры измеряют избыточное давление (давление, превышающее атмосферное). *Абсолютное давление* – сумма манометрического (избыточного) и барометрического (атмосферного) давления. Для определения абсолютного давления воспользуемся формулой

$$P = B + P_{\text{ман}},$$

где  $B$  – атмосферное давление, измеренное барометром, Па.

Соответственно

$$P_1 = P_{1 \text{ ман}} \cdot 9,81 \cdot 10^4 + B, \text{ Па};$$

$$P_2 = P_{2 \text{ ман}} \cdot 9,81 \cdot 10^4 + B, \text{ Па}.$$

(1 МПа =  $10^6$  Па.)

Определив температуры  $t_1$  и  $t_2$ , °С, и давления  $P_1$  и  $P_2$  воспользуемся таблицей теплофизических свойств фреона-12 (Приложение 2).

Из рис. 4.3 видно, что точка 2 лежит на линии сухого насыщенного пара:

$$h_2 = h''_{(t_2)}, \text{ кДж/кг};$$

$$s_2 = s''_{(t_2)}, \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Точка 3 лежит на линии кипения:

$$h_3 = h'_{(t_2)}, \text{ кДж/кг};$$

$$s_3 = s'_{(t_2)}, \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Процесс 3–4 – дросселирование,  $h = \text{const}$ , следовательно

$$h_4 = h_3, \text{ кДж/кг}.$$

Для того, чтобы найти параметры в точке 1, надо вначале найти степень сухости в этой точке. Это можно сделать исходя из

$$s_1 = s_2, \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$x_1 = \frac{s_1 - s'(t_1)}{s''(t_1) - s'(t_1)}.$$

Значение  $x_1$  находится в пределах  $0,9 \div 1$  (для проверки). Тогда

$$h_1 = h''(t_1) \cdot x_1 + h'(t_1) (1 - x_1), \text{ кДж/кг.}$$

Удельное количество теплоты, отдаваемое конденсатором в систему отопления помещения:

$$q_1 = h_2 - h_3, \text{ кДж/кг.}$$

Удельное количество низкопотенциальной теплоты, подведенное из окружающей среды к испарителю:

$$q_2 = h_1 - h_4, \text{ кДж/кг.}$$

Удельная работа цикла

$$l_{\text{цикла}} = q_1 - q_2 = h_2 - h_1, \text{ кДж/кг.}$$

В процессе дросселирования работа не производится, поэтому работа цикла равна работе компрессора. Мощность компрессора  $N = 0,2$  кВт.

Расход хладагента

$$G = N / l_{\text{цикла}}, \text{ кг/с,}$$

где  $N$  – кВт;  $l_{\text{цикла}}$  – кДж/кг.

Количество теплоты, отдаваемое конденсатором в систему отопления помещения:

$$Q_1 = q_1 \cdot G, \text{ кВт.}$$

Количество низкопотенциальной теплоты, подведенное из окружающей среды к испарителю:

$$Q_2 = q_2 \cdot G, \text{ кВт.}$$

Отопительный коэффициент

$$\varepsilon = q_1 / l_{\text{цикла}}.$$

Значение отопительного коэффициента должно быть больше единицы, что показывает, что в систему отопления помещения отдано теплоты больше, чем затрачено работы, в  $\varepsilon$  раз за счет использования низкопотенциальной теплоты наружного воздуха. Это следует отразить в выводах.

#### Контрольные вопросы по лабораторной работе № 4

1. Цель лабораторной работы и объект исследования.
2. Для чего нужны тепловые насосы, область их применения?
3. Устройство и принцип работы теплового насоса.
4. Источники низко потенциальной теплоты.
5. Какие вещества можно использовать в качестве хладагента в тепловых насосах?

6. Каким образом хладагент поглощает теплоту, а затем отдает ее?
7. Могут ли использоваться для теплоснабжения низко потенциальные источники теплоты напрямую без специальных устройств?
8. Является ли целесообразным обогрев помещения с помощью теплового насоса? Если да, то почему?
9. В каком направлении тепловой насос переносит теплоту (от холодного источника к горячему или наоборот)?
10. Что происходит при испарении хладагента (выделение или поглощение тепловой энергии)?
11. Что происходит при конденсации хладагента (выделение или поглощение тепловой энергии)?
12. Что характеризует отопительный коэффициент теплового насоса? Порядок его величины.
13. За счет чего происходит повышение температуры хладагента в тепловом насосе?
14. В какой части установки осуществляется подвод энергии?
15. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.
16. Перечислить величины, измеряемые в лабораторной работе, единицы измерения.
17. С помощью каких приборов проводились измерения?

## Лабораторная работа № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

**Цель работы:** определение эффективности водо-водяного рекуперативного теплообменника, экспериментальное нахождение коэффициента теплопередачи, сравнение прямотока и противотока.

#### Общие сведения

**Теплопередача или теплообмен** – учение о самопроизвольных, необратимых процессах распространения теплоты в пространстве. *Под процессом распространения теплоты* понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами и между областями рассматриваемой среды. Перенос теплоты осуществляется тремя основными способами: *теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.*

**Теплопроводность** представляет собой молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменной температурой в рассматриваемом пространстве.

Явление теплопроводности представляет собой процесс распространения энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела или отдельных тел, имеющих разные температуры. Теплопроводность обусловлена

движением микрочастиц вещества. В газах перенос энергии осуществляется путем диффузии молекул и атомов, а в жидкостях и твердых телах, диэлектриках – путем упругих волн. В металлах перенос энергии в основном осуществляется путем диффузии свободных электронов, а роль упругих колебаний кристаллической решетки здесь второстепенна.

**Конвекция** – процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

**Тепловое излучение** – процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела, при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучения. В природе и технике элементарные процессы распространения теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение – часто происходят совместно.

Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твердых телах.

Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется **конвективным теплообменом**.

Одна из основных проблем, поставленных в Государственной программе Республики Беларусь по энергосбережению, – экономия и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов нашей страны, эффективное использование теплоиспользующего оборудования.

Примером такого оборудования являются теплообменные аппараты (ТА).

**Теплообменными аппаратами** называются устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой. По принципу действия теплообменные аппараты могут быть разделены на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

**Рекуперативные теплообменные аппараты** представляют собой устройства, в которых две жидкости с различными температурами текут в пространстве, разделенном твердой стенкой. Теплообмен происходит за счет конвекции и теплопроводности стенки, а если хоть одна из жидкостей является излучающим газом, то и за счет теплового излучения.

**Регенеративные теплообменные аппараты** – это устройства, в которых одна и та же поверхность омывается то горячей, то холодной жидкостью. Сначала поверхность регенератора отбирает тепло от горячей жидкости и нагревается, затем поверхность регенератора отдает энергию холодной жидкости. Таким образом, в регенераторах теплообмен всегда происходит в нестационарных условиях, тогда как рекуперативные теплообменные аппараты работают большей частью в стационарном режиме.

В *смесительных теплообменных аппаратах* теплопередача осуществляется при непосредственном контакте и смешении горячей и холодной жидкостей.

Характер изменения температур рабочих сред по поверхности рекуперативного теплообменного аппарата зависит от схемы их движения. Наиболее простыми схемами движения являются: протокоток (рис. 5.1, а), противоток (рис. 5.1, б) и перекрестный ток (рис. 5.1, в). Существуют аппараты и с более сложными схемами движения теплоносителя.

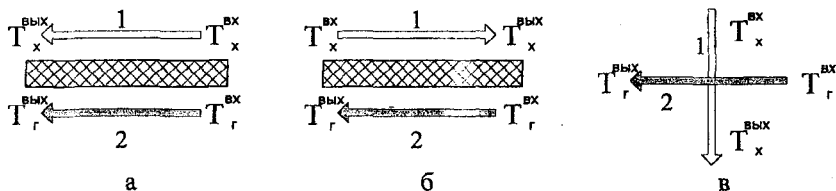


Рис. 5.1. Схемы движения рабочих сред

От того, какая схема движения сред применена, во многом зависит эффективность теплообменного аппарата.

Расчет ТА, работающих в стационарном режиме, ведется на основе двух уравнений – теплового баланса и теплопередачи. Уравнение теплового баланса означает равенство количества тепла, отдаваемого горячим теплоносителем ( $Q_{гор}$ ), сумме количеств тепла, воспринимаемого холодным теплоносителем, ( $Q_{хол}$ ) и потерь в окружающую среду  $Q_{ос}$ :

$$Q_{гор} = Q_{хол} + Q_{ос}.$$

Пренебрегая потерями тепла в окружающую среду, имеем  $Q_{гор} = Q_{хол} = Q$ , или

$$Q = G_{гор} \cdot \bar{c}_p_{гор} \cdot \Delta T_{гор} = G_{хол} \cdot \bar{c}_p_{хол} \cdot \Delta T_{хол}, \quad (5.1)$$

здесь  $G_{гор}$ ,  $G_{хол}$  – соответственно массовые расходы горячей и холодной воды, кг/с;  $\bar{c}_p_{гор}$ ,  $\bar{c}_p_{хол}$  – средние изобарные удельные теплоемкости горячей и холодной воды;  $\bar{c}_p_{гор} = \bar{c}_p_{хол} = 4187$  Дж/(кг·К);  $\Delta T_{гор}$  и  $\Delta T_{хол}$  – изменения температур горячей и холодной воды.

$$\Delta T_{гор} = T_{гор}^{вх} - T_{гор}^{вых}; \quad \Delta T_{хол} = T_{хол}^{вых} - T_{хол}^{вх}.$$

Уравнение теплопередачи определяет количество теплоты  $Q$ , передаваемой через заданную поверхность площадью  $F$ , если заданы средние температуры греющего  $\bar{T}_{гор}$  и нагреваемого  $\bar{T}_{хол}$  теплоносителей [1]:

$$Q = K(\bar{T}_{гор} - \bar{T}_{хол}) F,$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи от одного теплоносителя к другому, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь поверхности теплообменника, м<sup>2</sup>.



Следовательно  $K$  – коэффициент теплопередачи равен:

$$K = \frac{Q}{(\bar{T}_{гор} - \bar{T}_{хол}) \cdot F}; \quad (5.2)$$

$$\bar{T}_{гор} = (T_{гор}^{вх} + T_{гор}^{вых})/2; \quad \bar{T}_{хол} = (T_{хол}^{вх} + T_{хол}^{вых})/2. \quad (5.3)$$

**Коэффициент теплопередачи,  $K$**  характеризует интенсивность передачи теплоты от одной среды к другой через разделяющую их стенку. Он численно равен количеству теплоты, проходящей через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между средами в один градус.

**Термодинамическая эффективность** теплообменника – это отношение количества теплоты, передаваемой в данном теплообменнике, к количеству теплоты, передаваемой в теплообменнике с бесконечно большой поверхностью теплообмена с теми же параметрами на входе. Эффективность теплообменника определяется по формуле

$$E = \frac{T_{хол}^{вых} - T_{хол}^{вх}}{T_{гор}^{вх} - T_{хол}^{вх}}. \quad (5.4)$$

### Сравнение прямотока с противотоком

Преимущества одной схемы течения теплоносителей перед другой определяются из сравнения количества теплоты, передаваемой при равных условиях, и коэффициентов теплопередачи.

Во всех случаях при прямотоке передается меньшее количество теплоты, т.е. противоток более экономичен по сравнению с прямотоком.

### Экспериментальная установка

Установка (рис. 5.2) представляет собой поверхностный теплообменник 1, выполненный из двух труб, размещенных одна внутри другой. По внутренней трубе протекает горячая вода (греющий теплоноситель). По наружной – холодная (нагреваемый теплоноситель).

Для определения температур горячей воды на входе и выходе из теплообменника установлены термомпары 3; холодной воды – термометры 2. ЭДС термопар регистрируется милливольтметром 5, подключенным через переключатель термомпар 4.

Расход горячего теплоносителя из термостата 8, протекающего через теплообменник, измеряется с помощью ротаметра 6. Регулирование расхода теплоносителя осуществляется вентилям 7. Переключение схемы с проточной, на противоточную производится преподавателем.

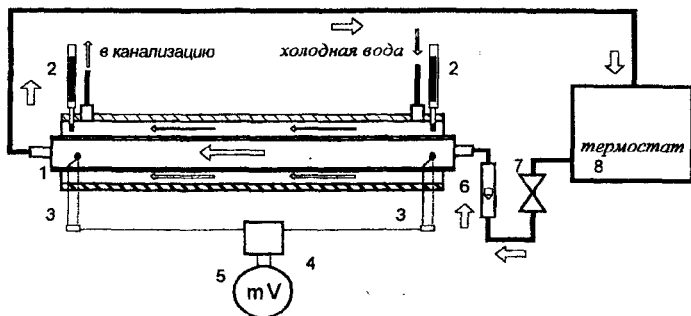


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки

### Порядок выполнения работы

Установка включается по прямоточной схеме. Открываются вентили, и в теплообменник при предельных расходах подается горячая и холодная вода. При достижении стационарного теплового режима, о наступлении которого судят по установившимся показаниям милливольтметра 5, приступают к измерению температур и расходов теплоносителей. С этой целью через равные промежутки времени (3-5 минут) снимаются показания милливольтметра, термопар и ротаметра. Затем вентиль установка включается по схеме «противоток» и опыт повторяется в той же последовательности, что и при прямотоке.

Результаты измерений вносятся в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Схема подключения	№ п/п	$T_{гор}^{вх},$ МВ	$T_{гор-}$ $вых, М$ В	$T_{х.с.},$ °С	$T_{гор}^{вх},$ °С	$T_{гор-}$ $вых, °С$	$T_{хол}^{вх},$ °С	$T_{хол-}$ $вых, °С$	$H,$ мм	$G_{гор},$ кг/с
Прямоток	1									
	2									
	3									
Сред. знач.										
Противоток	1									
	2									
	3									
Сред. знач.										

### Обработка экспериментальных данных

1. Определить средние значения параметров для каждого режима (прямотока и противотока). Температура горячего теплоносителя определяется по градуировочной таблице (Приложение 2) плюс температура холодных спаев термопар (поправка на холодный спай).

2. Расход горячего теплоносителя по тарифовочной (Приложение 4) кривой определяется по показаниям ротаметра.
3. Количество теплоты, переданной от одного теплоносителя к другому, определяется из выражения (5.1).
4. Средние температуры теплоносителей определяются по формуле (5.3) и из формулы (5.2) определяется коэффициент теплопередачи  $K$  при различных схемах движения теплоносителя.
5. Эффективность аппарата находится по формуле (5.4).
6. Полученные в эксперименте, численные значения количества тепла воспринятые холодным теплоносителем, коэффициенты теплопередачи и термодинамической эффективности теплообменника, необходимо сравнить для прямоточной и противоточной схем. Сделать вывод о целесообразности применения, схемы движения рабочих сред в рекуперативном теплообменнике.

### **Контрольные вопросы по лабораторной работе № 5**

1. Цель лабораторной работы и объект исследования.
2. Что такое теплообмен?
3. В каких случаях возникает теплообмен?
4. Основные способы переноса теплоты и их особенности.
5. Что называется теплообменным аппаратом? Виды теплообменных аппаратов
6. Что такое рекуперативный теплообменник?
7. Что такое теплоноситель?
8. Назвать основные схемы движения теплоносителей.
9. Как определить количество теплоты, передаваемое при теплопередаче?
10. Единицы измерения количества теплоты.
11. Что такое коэффициент теплопередачи: физический смысл, единицы измерения?
12. От чего зависит коэффициент теплопередачи рекуперативного теплообменника?
13. Как определить термодинамическую эффективность теплообменника?
14. Как определить преимущества одной схемы течения теплоносителей перед другой?
15. При какой схеме движения теплоносителей можно нагреть воду в теплообменнике до более высокой температуры?
16. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.
17. Какими приборами измеряется температура и расход теплоносителей в лабораторной установке.

## Лабораторная работа № 6

### ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

(сравнительное исследование тепловой трубы)

**Цель работы:** определение и сравнение коэффициентов эффективной теплопроводности тепловой трубы и медного стержня.

#### Общие сведения

Теплопередача или теплообмен – учение о самопроизвольных, необратимых процессах распространения теплоты в пространстве. Под процессом распространения теплоты понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами и между областями рассматриваемой среды. Перенос теплоты осуществляется тремя основными способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

**Теплопроводность** представляет собой молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменной температурой в рассматриваемом пространстве.

**Явление теплопроводности** представляет собой процесс распространения энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела или отдельных тел, имеющих разные температуры. Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц вещества. В газах перенос энергии осуществляется путем диффузии молекул и атомов, а в жидкостях и твердых телах-диэлектриках – путем упругих волн. В металлах перенос энергии в основном осуществляется путем диффузии свободных электронов, а роль упругих колебаний кристаллической решетки здесь второстепенна.

**Конвекция** – процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

**Тепловое излучение** – процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела, при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучения. В природе и технике элементарные процессы распространения теплоты (теплопроводность, конвекция и тепловое излучение) часто происходят совместно.

Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твердых телах.

Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется **конвективным теплообменом**.

**Коэффициент теплопроводности**  $\lambda$  численно равен количеству теплоты ( $Q$ ), передаваемой механизмом теплопроводности через единицу площади ( $F$ ) в единицу времени ( $\Delta\tau$ ) при градиенте температуры, равном единице:

$$\lambda = \frac{Q}{F \Delta\tau \text{ grad } t}. \quad (6.1)$$

В соответствии со своим определением коэффициент теплопроводности имеет размерность Дж·м/м<sup>2</sup>·с·К=Вт/м·К

**Градиент температуры** (К/м) – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности (поверхности с одинаковыми температурами) в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры по этому направлению:

$$\text{grad } t = n_o \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (6.2)$$

Градиент температуры характеризует изменение температуры в определенном направлении.

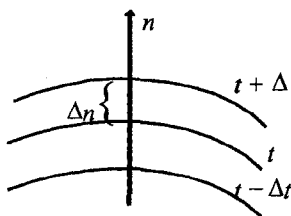


Рис. 6.1. Направление вектора градиента температур

Коэффициент теплопроводности является одной из важнейших теплофизических характеристик вещества и наибольшие значения имеет у металлов, а среди них у серебра, меди, золота, алюминия. В связи с этим одним из самых распространенных конструкционных материалов в теплоэнергетических устройствах является медь ( $\lambda_{\text{медь}} \approx 390$  Вт/(м·К)).

Из формулы (6.1) видно, что чем больше коэффициенты теплопроводности, тем меньшие перепады температуры требуются для передачи одного и того же количества теплоты. Или, другими словами, чем больше эти коэффициенты, тем большее количество теплоты передается при всех прочих равных условиях, то есть теплопередающее устройство работает более эффективно.

Эффективное решение проблем теплообмена в значительной мере обеспечивает и общую эффективность теплоэнергетических систем и установок. Одним из таких решений часто является использование оригинальных теплопередающих устройств, называемых **тепловыми трубами**.

Впервые идея тепловой трубы была предложена американским инженером Гоглером в 1942 г. Но только в начале 1960-х годов, после того как другой американский ученый Гровер независимо от Гоглера вновь изобрел и в 1963 году запатентовал ее, тепловые трубы получили интенсивное развитие. К настоящему

времени созданы тысячи модификаций тепловых труб с различными функциями и широко применяемых.

Тепловая труба представляет собой устройство, обладающее очень высокой теплопередающей способностью. Если характеризовать ее эквивалентным 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, сопровождаемый фазовыми переходами (испарением и конденсацией) жидкости-теплоносителя. При подводе теплоты к одному концу тепловой трубы жидкость нагревается, закипает и превращается в пар (испаряется). При этом она поглощает большое количество теплоты (теплота парообразования), которое переносится паром к другому более холодному концу трубы, где пар конденсируется и отдает поглощенную теплоту. Например, при нагреве воды от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температуры кипения) к ней требуется подвести количество теплоты равное  $Q = C_p \cdot \Delta T = 4,187 \cdot 100 = 418,7$  кДж/кг. Для того, чтобы превратить кипящую жидкость в пар той же температуры, надо подвести еще теплоту парообразования, равную  $22578,2$  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, жидкость стекает вниз непосредственно под действием силы тяжести. Такой вариант тепловой трубы называется **термосифоном**. Естественно, эффективность работы термосифона зависит от его ориентации относительно направления силы тяжести.

Для исключения этого недостатка 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), основное назначение которого – распределение жидкости на поверхности теплообмена в виде тонкой пленки и поддержание этой пленки с помощью капиллярных сил в широком диапазоне тепловых нагрузок, по которому под действием капиллярных сил и термодиффузии происходит обратное движение жидкости. Такая тепловая труба называется **тепловой трубой с фитилем**.

Принципиальная схема тепловой трубы с фитилем изображена на рис. 6.2.

Основными преимуществами таких тепловых труб являются: высокая эффективность теплообмена, автономность работы, малый вес и габариты, высокая надежность, возможность реализации сложных теплопередающих функций, высокая изотермичность поверхности трубы.

Тепловая труба может иметь различные формы и габариты. Внутренний диаметр трубы 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.

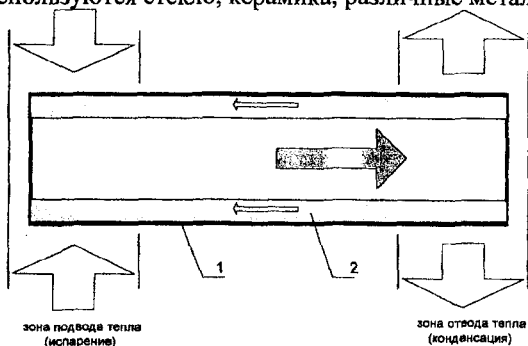


Рис. 6.2. Принципиальная схема тепловой трубы с фитилем:

1 – корпус, 2 – капиллярно-пористый слой (фитиль);  $\Rightarrow$  – направление движения пара (направление переноса теплоты);  $\leftarrow$  – направление движения жидкости (конденсата)

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

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

а) по температурному диапазону:

- криогенные тепловые трубы  $T < 200$  К,
- низкотемпературные тепловые трубы  $T = 200 \div 550$  К;
- тепловые трубы умеренного диапазона  $T = 550 \div 750$  К;
- высокотемпературные тепловые трубы  $T > 750$  К;

б) по виду теплоносителей различают металлические (натрий, калий, цезий, серебро, ртуть и т.д. и неметаллические теплоносители (вода, аммиак, ацетон, фреоны, спирты, четыреххлористый углерод, бензины, а также криогенные жидкости, высокотемпературные органические теплоносители – дефинил, даутерм, сера с добавками галогенов, расплавы солей, азотный тетраоксид, смеси жидкостей и твердых частиц;

в) по параметрам, характеризующим работу тепловых труб: термическому сопротивлению, плотностью теплового потока через поперечное сечение трубы, плотность радиального теплового потока, диапазона рабочих температур.

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

тепловых режимов космических аппаратов, для охлаждения электронных приборов и систем, создания регенеративных теплообменников.

### Экспериментальная установка

Основными элементами лабораторной установки (рис. 6.3) являются укрепленные на штативах тепловая труба (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). Подаваемая на нагреватели тепловая мощность  $N$  измеряется вольтметром ( $U$ ) и амперметром ( $I$ ) и определяется  $N = I \cdot U$ . 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 установлены по три термомпары (6) (две по концам и одна в центре), определяющие температуры в соответствующих точках. Показания термомпар через коммутационные устройства (7) регистрируются измерителем малых ЭДС – самопишущим потенциометром КСП-4 (8).

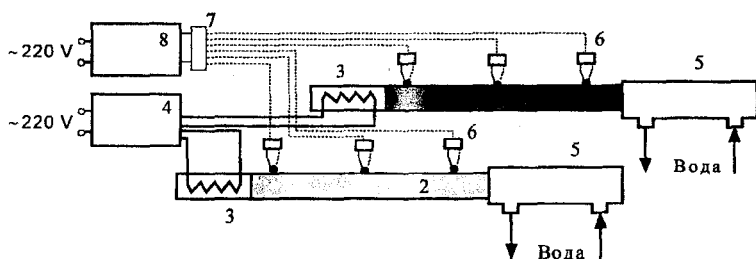


Рис. 6.3. Схема лабораторной установки:

1 – тепловая труба; 2 – медный стержень; 3 – электрический нагреватель; 4 – блок питания; 5 – холодильник; 6 – датчики температуры (термомпары); 7 – коммутатор; 8 – самопишущий потенциометр КСП-4)

### 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 каждого из нагревателей тепловой трубы и медного стержня и занести эти данные в табл. 6.1.
3. Включить питание потенциометра КСП-4.



Поочередно опрашивая все шесть термопар, установленных в тепловой трубе и медном стержне, потенциометр начнет печатать на бумажной ленте соответствующие значения температур через определенные промежутки времени. Показания каждой термопары пропечатываются цифрами, соответствующими номеру термопары. По мере прогрева тепловой трубы и медного стержня будет наблюдаться рост температуры в каждой точке с постепенным выходом на постоянное значение (стационарный режим). *Стационарным* считают режим, при котором значение определяемой величины не изменяются с течением времени (при этом показания каждой из термопар в соседних по времени точках будут отличаться менее чем на 10 %).

Обратить 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. 6.1.

Таблица 6.1

Мощность нагревателя, Вт	Тепловая труба			Медный стержень		
	$W_{тн} = \frac{UI}{2}$			$W_{м.с} = \frac{UI}{2}$		
Номера термопар	1	2	3	4	5	6
τ, мин.	Показания термопар, °С					
0						
2						
4						
6						
8						
10						
12						
λ, Вт/(м·К)						

### Обработка экспериментальных данных

При обработке экспериментальных данных считать, что вся потребляемая нагревателями электрическая мощность  $W$  превращается в тепловую и полностью передается через тепловую трубу и медный стержень. (При этом пренебрегают потерями теплоты через их боковые теплоизолированные поверхности). Тогда количество теплоты, передаваемое через поперечное сечение тепловой трубы и медного стержня в единицу времени, равно мощности нагревателей.

С учетом этого, формулы (6.1), (6.2) для вычисления коэффициентов теплопроводности примут вид

$$\lambda = \frac{W}{F \cdot \text{grad } t}, \quad (6.3)$$

$$\text{где } \text{grad } t = \frac{\Delta t}{L}. \quad (6.4)$$

1. Используя экспериментальные данные стационарного режима, вычислить по этим формулам коэффициент теплопроводности  $\lambda$  для тепловой трубы и медного стержня и занести их в табл. 6.1. Убедиться в том, что значения этих коэффициентов у тепловой трубы значительно выше, чем у медного стержня.

2. Построить график зависимости температуры тепловой трубы и медного стержня во времени (по показаниям средних термопар – № 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 термопар в стационарном режиме. Убедиться в том, что распределение температуры вдоль тепловой трубы более равномерно, чем вдоль медного стержня.

#### ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Вычисленный коэффициент теплопроводности для тепловой трубы имеет некоторое *эффективное значение*, поскольку основным механизмом переноса теплоты в нем является не теплопроводность, а конвекция. Тем не менее, сравнение этой величины с теплопроводностью медного стержня дает их сравнительную характеристику в пользу тепловой трубы.

2. В качестве перепада температур  $\Delta t$  для вычислений использовать разность показаний в стационарном режиме крайних термопар (1 и 3 для тепловой трубы и термопар 4 и 6 для медного стержня).

3. Площади  $F$  поперечного сечения тепловой трубы и медного стержня определяются по их диаметрам, диаметр тепловой трубы  $d = 13$  мм, длина  $L = 250$  мм, диаметр стержня  $d = 12$  мм, длина  $L = 250$  мм.  $F = \pi d^2/4 \text{ м}^2$ .

#### Контрольные вопросы по лабораторной работе № 6

1. Цель лабораторной работы и объект исследования.
2. Что такое теплообмен?
3. Основные способы переноса теплоты и их особенности.
4. Что такое коэффициент теплопроводности: физический смысл, единицы измерения.
5. Градиент температуры, его физический смысл.
6. Описать устройство и принцип действия тепловых труб.
7. Чем обусловлена высокая эффективность переноса теплоты тепловой трубой?
8. В какой части трубы происходит поглощение теплоты?
9. Что происходит в зоне испарения тепловой трубы? Что происходит в зоне конденсации?
10. Как осуществляется возврат сконденсированной жидкости в зону испарения?
11. Основные преимущества тепловых труб с фитилем.
12. Требуются ли затраты энергии (подвод электроэнергии) на перенос теплоты тепловой трубой?

13. Какие вещества используются в качестве жидкости-теплоносителя для тепловых труб?
14. Перечислить области применения тепловых труб.
15. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.
16. Какое устройство (тепловая труба или медный стержень) быстрее выходит на стационарный режим и имеет более равномерное распределение температур по длине? Почему?
17. Сравнить коэффициенты теплопроводности для тепловой трубы и медного стержня.
18. Какое устройство обеспечивает перенос одинакового количества тепла при минимальной разности температур: тепловая труба или медный стержень? Почему?

## Лабораторная работа № 7

### ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

**Цель работы:** изучение принципа преобразования энергии ветра в электрическую энергию, устройства ветроколеса и 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 виды энергии, называются *ветроэнергетическими установками* (ВЭУ) или *ветроустановками*.

Энергия ветра в механических установках, например, на мельницах и в водяных насосах, используется уже несколько столетий. После резкого скачка цен на нефть в 1973 г. интерес к таким установкам резко возрос. Большая часть существующих ветроустановок построена в конце 1970-х – начале 1980-х гг. на современном техническом уровне при широком использовании последних достижений аэродинамики, механики, микроэлектроники для контроля и управления ими.

Белорусская энергетическая программа до 2010 года основными направлениями использования ветроэнергетических ресурсов на ближайший период предусматривает их применение для привода насосных установок и в качестве источников энергии для электродвигателей автономного обеспечения. Эти области применения характеризуются минимальными требованиями к качеству электри-

ческой энергии, что позволяет резко упростить и удешевить ветроэнергетические установки.

При правильной организации использования ветроэнергетики такой дешевой 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:

- 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 и т.п.;
- 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 энергии и т.п.);
- 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 в принципе 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  $F_c$ , и 2 – в направлении, перпендикулярном скорости набегающего потока, называемую подъемной силой  $F_{\Pi}$  (рис. 7.1).

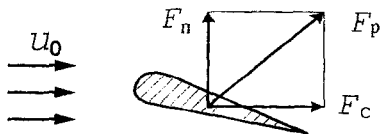


Рис. 7.1. Силы, действующие на тело, обтекаемое потоком газа

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

Ветроколесо с горизонтальной осью, использующее подъемную силу (двух- или трехлопастное ветроколесо), показано на рис. 7.2 (а, б, в, г).

Ветроустановки, использующие силу лобового сопротивления, состоят из укрепленных вертикально оси лопастей различной конфигурации (рис. 7.2 е, ж, з, и, к).

На рис. 7.2, 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.

Каждое ветроколесо характеризуется:

■ **ометаемой площадью  $S$** , ветроколеса называют площадь, покрываемая его лопастями при вращении в плоскости перпендикулярной направлению потока. Для репеллерного ветроколеса (горизонтально осевого) –

$$S = \pi D^2 / 4, \quad (7.1)$$

где  $D$  – диаметр ветроколеса,

для ветроколеса Савониуса (вертикально осевого) –

$$S = h b, \quad (7.2)$$

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

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

■ коэффициентом мощности  $C_p$ , характеризующим эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока и зависящим от конструкции ветроколеса;

■ коэффициентом быстроходности  $Z$ , представляющим собой отношение скорости конца лопасти к скорости ветра.

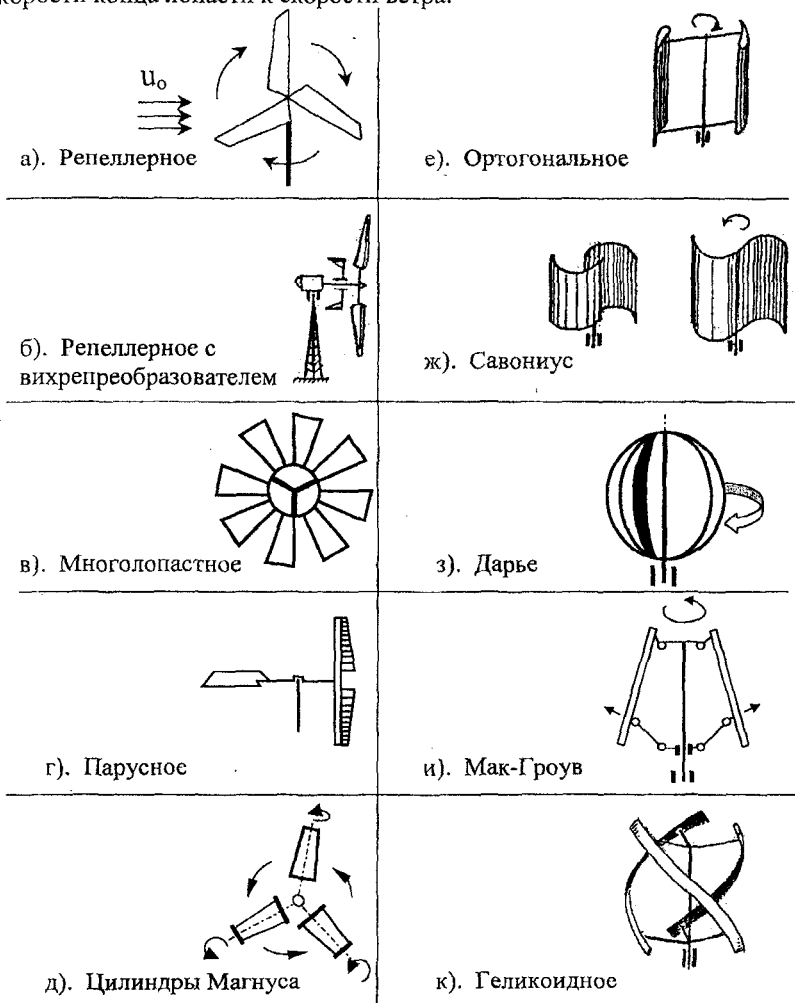


Рис. 7.2. Типы ветряных колес

При скорости ветра  $u_0$  и плотности воздуха  $\rho$  ветроколесо с ометаемой площадью  $S$  развивает мощность

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

Из этой формулы видно, что эта мощность 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, и 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. 7.3). 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).

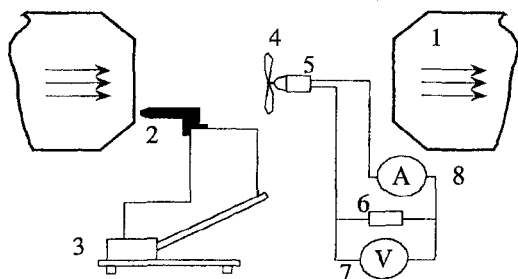


Рис. 7.3. Схема экспериментальной установки

### 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. 7.1.
5. Измерить напряжение  $U$ , создаваемое электрическим генератором, и ток  $I$  в нагрузке б.
6. Изменить величину скорости воздушного потока в аэродинамической трубе. Произвести все для данного ветроколеса не менее 8 измерений вышеуказанных измерений.
7. Заменить ветроколесо. Выполнить измерения, описанные в пп. 3–6.

Таблица 7.1

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

$$u_0 = \sqrt{2g \frac{\rho_{ж}}{\rho_{в}} K(l - l_0)}, \quad (7.3)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность спирта в микроманометре ( $\rho_{ж} = 809,5 \text{ кг/м}^3$ );

$\rho_{в}$  – плотность воздуха ( $\rho_{в} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ );

$(l - l_0)$  – разность показаний микроманометра, м;

$K$  – синус угла наклона трубки микроманометра (указан на микроманометре).

2. Вычислить электрическую мощность генератора

$$N = UI. \quad (7.4)$$

3. Определить коэффициент мощности ветроколеса

$$C_N = 2N / (S \rho_{в} u_0^3). \quad (7.5)$$

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.

### Контрольные вопросы по лабораторной работе № 7

1. Цель лабораторной работы и объект исследования.



2. Что является источником ветра?
3. Можно ли преобразовать энергию ветра в электрическую? Если да, то с помощью какого устройства?
4. Для чего предназначены ветроэнергетические установки?
5. Позволяют ли климатические условия использовать энергию ветра на территории Беларуси?
6. Области применения ветроэнергетических установок (ВЭУ).
7. Преимущества ВЭУ по сравнению с другими видами источников энергии.
8. Наилучшие места установки ветроэнергетических установок.
9. Принцип действия ВЭУ.
10. Классификация ВЭУ.
11. Назвать основные величины, характеризующие ветроколесо.
12. От каких величин зависит мощность, развиваемая ветроколесом?
13. Как зависит мощность ветроколеса от геометрического заполнения?
14. Сравнить характеристики колеса Савониуса и репеллерного колеса.
15. Чем характеризуется эффективность преобразования ветроколесом энергии ветра в электрическую?
16. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.
17. Какое устройство преобразует механическую энергию ветроколеса в электрическую?
18. Как определить скорость потока воздуха?
19. Как зависит коэффициент мощности ветроколеса от скорости ветра?

## Лабораторная работа № 8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА НА ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

**Цель работы:** изучение принципа действия теплообменника на тепловых трубах, его конструктивного исполнения и экспериментальное определение его характеристик: коэффициента эффективности и количество теплоты, воспринятое воздухом в теплообменнике.

#### Общие сведения

**Теплопередача или теплообмен** – учение о самопроизвольных, необратимых процессах распространения теплоты в пространстве. Под процессом **распространения теплоты** понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами и между областями рассматриваемой среды.

Перенос теплоты осуществляется тремя основными способами: **теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.**

**Теплопроводность** представляет собой молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменной температурой в рассматриваемом пространстве.

Явление теплопроводности представляет собой процесс распространения энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела или отдельных тел, имеющих разные температуры. Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц вещества. В газах перенос энергии осуществляется путем диффузии молекул и атомов, а в жидкостях и твердых телах – диэлектриках – путем упругих волн. В металлах перенос энергии в основном осуществляется путем диффузии свободных электронов, а роль упругих колебаний кристаллической решетки здесь второстепенна.

**Конвекция** – процесс переноса теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

**Тепловое излучение** – процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела, при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучением.

В природе и технике элементарные процессы распространения теплоты: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение – часто происходят совместно.

Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твердых телах.

Конвективный перенос теплоты всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется **конвективным теплообменом**.

Одна из основных проблем, поставленных в Государственной программе Республики Беларусь по энергосбережению – проблема экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов нашей страны, эффективное использование теплоиспользующего оборудования.

Примером такого оборудования являются теплообменные аппараты (ТА).

**Теплообменными аппаратами** называются устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой. По принципу действия теплообменные аппараты могут быть разделены, на рекуперативные, регенеративные и смешительные. Рабочими веществами в теплообменных аппаратах являются, как правило, текучие среды – жидкости и газы.

**Рекуперативные теплообменные аппараты** представляют собой устройства, в которых две жидкости с различными температурами текут в пространстве, разделенном твердой стенкой. Теплообмен происходит за счет конвекции и теплопроводности стенки.

**Регенеративные теплообменные аппараты** – это устройства, в которых одна и та же поверхность омывается то горячей, то холодной жидкостью. Сначала поверхность регенератора отбирает теплоту от горячей жидкости и нагревается, затем поверхность регенератора отдает энергию холодной жидкости.

В *смесительных теплообменных аппаратах* теплопередача осуществляется при непосредственном контакте и смешении горячей и холодной жидкостей.

Тепловая труба представляет собой устройство, обладающее очень высокой теплопередающей способностью. (Принцип действия тепловой трубы и ее устройство описаны в лабораторной работе № 6). Благодаря этому с ее помощью можно осуществить эффективный перенос теплоты от горячего теплоносителя к холодному. Схема такого переноса изображена на рис. 8.1. Горячий теплоноситель омывает одну половину тепловой трубы и нагревает ее. Поступившая теплота передается вдоль тепловой трубы на вторую ее половину, которая омывается холодным теплоносителем. Холодный теплоноситель нагревается и уносит поступившую теплоту.

Пучок тепловых труб, заключенных в единый корпус, с отдельными каналами для холодного и горячего теплоносителя, представляет собой основной элемент теплообменника, общий вид которого изображен на рис. 8.2. Наличие развитого оребрения на внешней теплообменной поверхности тепловых труб и реализация внутри них замкнутого испарительно-конденсационного цикла обеспечивает высокую эффективность теплопередачи при сравнительно небольших габаритах таких устройств.

В силу своих особенностей теплообменники на тепловых трубах оказываются особо эффективными, если теплоносителями являются газы, и могут, например, широко использоваться в воздушных системах вентиляции для утилизации теплоты выбрасываемого загрязненного воздуха. Кроме того, с их помощью можно осуществлять эффективную утилизацию теплоты газообразных продуктов сгорания топлива.

Используя различные рабочие жидкости в тепловых трубах можно создавать теплообменники на их основе для работы в самых различных температурных диапазонах. В качестве рабочих тел в тепловых трубах наиболее часто применяются вода, хладоны, ацетон, спирты, аммиак, криогенные жидкости.

Эффективность работы теплообменного аппарата определяется по количеству переданного тепла и коэффициенту термодинамической эффективности теплообменного аппарата.

*Термодинамическая эффективность* теплообменника есть отношение количества теплоты, передаваемого в данном теплообменнике, к максимально возможному количеству теплоты, передаваемому в теплообменнике с бесконечно-большой поверхностью теплообмена, при одних тех же параметрах теплоносителей на входе и выходе. Эффективность теплообменника определяется по формуле

$$E = \frac{T_{\text{хол}}^{\text{вых}} - T_{\text{хол}}^{\text{вх}}}{T_{\text{гор}}^{\text{вх}} - T_{\text{хол}}^{\text{вх}}}, \quad (8.1)$$

где  $T_{\text{хол}}^{\text{вх}}$ ,  $T_{\text{хол}}^{\text{вых}}$  – температуры холодной воздуха на входе и выходе,  
 $T_{\text{гор}}^{\text{вх}}$ , – температуры горячей воздуха на входе.

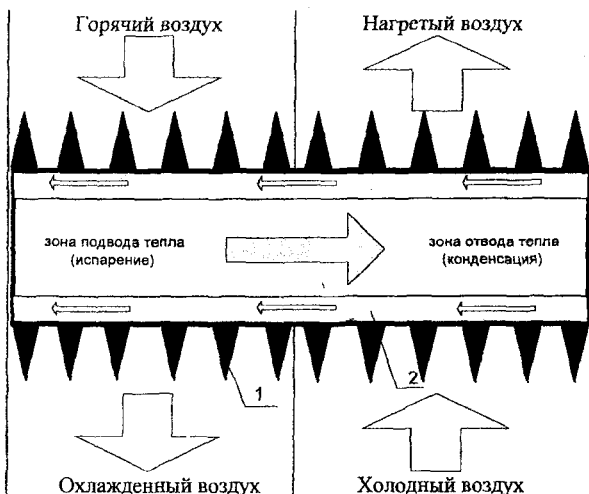


Рис. 8.1. Схема передачи тепловой энергии в оребренной тепловой трубе

При этом количество теплоты, воспринятое воздухом в теплообменнике, определяется выражением

$$Q_v = V c_v (t_{\text{пр}} - t_{\text{нач}}), \quad (8.2)$$

где  $c_v$  — объемная теплоемкость воздуха, равная  $1,26 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  
 $t_{\text{пр}}$  — температура воздуха нагретого в теплообменнике,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $t_{\text{нач}}$  — температура воздуха перед теплообменником,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $V$  — объемный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

### Экспериментальная установка

Схема экспериментального теплообменника на тепловых трубах изображена на рис. 8.2. Верхняя часть теплообменника представляет собой канал холодного воздуха, нижняя часть — канал горячего воздуха. Оба канала пересекают пучок тепловых труб  $T-T$ .

В канал горячего воздуха комнатный воздух всасывается с помощью вентилятора  $B-1$ , далее поступает в конфузور, в котором расположен спиральный нагреватель, выполненный из нихромовой проволоки и имеющий две ступени нагрева. В этом месте комнатный воздух нагревается и затем поступает в пространство между оребренными тепловыми трубами  $T-T$ . Отдав часть теплоты тепловым трубам, охлажденный воздух выходит через раструб  $P-1$  наружу.

В канал холодного воздуха комнатный воздух всасывается с помощью вентилятора  $B-2$ , поступает во вторую половину пространства между тепловыми трубами где принимает теплоту, отданную горячим воздухом, и нагретым выходит наружу через раструб  $P-2$ .

Вентилятор *B-1* и нагреватели питаются непосредственно от сети переменного тока напряжением 220 В.

Вентилятор *B-2* с целью регулирования расхода воздуха питается от регулятора напряжения типа ЛАТР, позволяющего изменять напряжение питания от 0 до 220 В.

На входе и выходе каждого канала расположены термопары, измеряющие температуры воздуха.

Показания термопар регистрируется цифровым вольтметром, подключенным к ним через шаговый переключатель.

Средняя скорость воздуха *v* в каждом из каналов определяется с помощью лепесткового анемометра, порядок работы с которым описан в данной инструкции. Объемный расход *V* воздуха определяется произведением средней скорости *v* на площадь поперечного сечения потока *S*:

$$V = v \cdot S \quad (8.3)$$

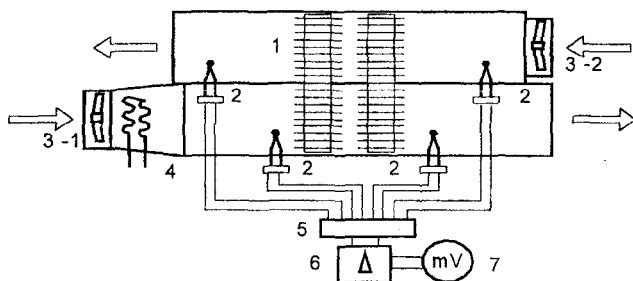


Рис. 8.2. Схема экспериментального теплообменника на тепловых трубах:  
 1 – пучок тепловых труб; 2 – термопары, измеряющие температуры горячего и холодного воздуха на входе и выходе соответственно; 3 – вентиляторы;  
 4 – нагреватель; 5 – колодка термопар; 6 – переключатель термопар;  
 7 – милливольтметр

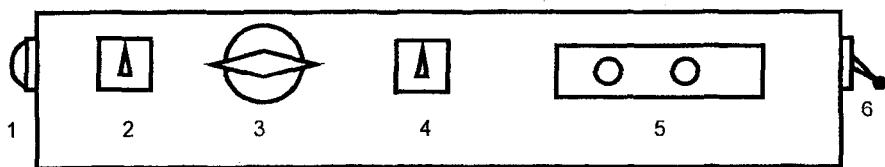


Рис. 8.3. Панель управления лабораторной установкой:

- 1 – сигнальная лампочка включения сети; 2 – тумблер включения сети;
- 3 – выключатель вентилятора 3 – 1 и нагревателя 4 канала горячего воздуха;
- 4 – выключатель вентилятора 3 – 2 канала холодного воздуха;
- 5 – разъем для подключения ЛАТРа, регулирующего питание вентилятора 3 – 2;
- 6 – двухпозиционный тумблер переключения мощности питания нагревателя 4

## Порядок выполнения работы

Управление установкой осуществляется с пульта управления, схема которого приведена на рис. 8.3.

1. Установить тумблер выключения сети (поз.2) в верхнее положение "Сеть". При этом загорится сигнальная лампочка (поз.1) на левой боковой стенке подставки.

2. Установить выключатель вентилятора  $B-1$  и нагревателя  $H$  (поз.3) в положение ВКЛ. При этом одновременно начинают работать вентилятор канала горячего воздуха  $B-1$  и нагреватель  $H$ .

**ВНИМАНИЕ:** *Нагреватель не может работать длительное время без обдува воздухом. Поэтому, если при включении нагревателя вентилятор не заработал, необходимо немедленно отключить установку от электропитания, поставив тумблер выключения сети в нижнее положение, и сообщить об этом преподавателю.*

3. Установить тумблер выключателя вентилятора канала холодного воздуха  $B-2$  (поз.4) в верхнее положение ВКЛ. При этом вентилятор  $B-2$  начинает работать.

4. С помощью ЛАТРа установить необходимую скорость вращения лопастей вентилятора  $B-2$ .

5. С помощью лепесткового анемометра определить среднюю скорость движения воздуха в выходных раструбах  $P-1$  и  $P-2$  обоих каналов и вычислить его объемный расход. Геометрические размеры раструбов: для  $P-1$  высота  $a = 130$  мм, ширина  $b = 135$  мм; для  $P-2$  высота  $a = 135$  мм, ширина  $b = 135$  мм.

6. По имеющемуся в лаборатории термометру определить температуру комнатного воздуха  $T_k$ .

7. Переключая шаговый переключатель снять показания всех четырех термопар по милливольтметру, определить относительные температуры  $\Delta T$  на входе и выходе горячего и холодного воздуха с помощью градуировочной таблицы (Приложение 2), а также абсолютные температуры  $T$ , прибавив к относительным температурам комнатную:  $T = T_k + \Delta T$ .

8. Не изменяя расходов воздуха в каналах, переключить тумблер переключения мощности питания нагревателя  $H$  (поз.6) во второе положение, изменив тем самым мощность нагревателя. Определить новые значения температур теплоносителей.

9. С помощью ЛАТРа установить новое значение скорости вращения лопастей вентилятора  $B-2$  в канале холодного воздуха и повторить все предыдущие измерения, описанные выше в пп.5-8.

Данные всех измерений и вычислений занести в табл. 8.1 - 8.2.



Помещенная в воздушный поток крестовина с лепестками начинает вращаться, причем, тем быстрее, чем больше скорость воздуха.

Анемометр снабжен тарировочной кривой, на которой каждой скорости вращения лепестков соотнесено определенное значение скорости воздушного потока.

Для проведения измерений с помощью анемометра необходимо:

1. Расположить рабочую часть анемометра в воздушном потоке.
2. Зафиксировать имеющиеся на счетчике числа оборотов показания ( $N_{нач}$ ) и одновременно с этим включить секундомер.
3. Через определенный промежуток времени  $\Delta t$  выключить секундомер и одновременно снять показания счетчика числа оборотов ( $N_{кон}$ ).
4. Вычислить число оборотов  $N$  в секунду, разделив разность снятых показаний счетчика на время промежутков времени измерения

$$N = (N_{кон} - N_{нач}) / \Delta t. \quad (8.4)$$

5. По тарировочной кривой определить, соответствующую данному числу оборотов  $W$  в секунду, скорость воздуха  $v$ .

Примечание: рекомендуемый промежуток времени измерений – 30 с.

### Контрольные вопросы по лабораторной работе № 8

1. Цель лабораторной работы и объект исследования.
2. Что такое теплообмен?
3. Основные способы переноса теплоты и их особенности.
4. Что называется теплообменным аппаратом? Виды теплообменных аппаратов
5. Что такое рекуперативный теплообменник?
6. Что такое теплоноситель?
7. Как определить количество теплоты, передаваемое при теплопередаче?
8. Единицы измерения количества теплоты.
9. Что такое коэффициент теплопередачи: физический смысл, единицы измерения?
10. От чего зависит коэффициент теплопередачи рекуперативного теплообменника?
11. Как определить термодинамическую эффективность теплообменника?
12. Основные элементы экспериментальной установки и их назначение.
13. С помощью каких приборов измеряется температура и расход теплоносителя в лабораторной установке.
14. Описать устройство и принцип действия тепловых труб.
15. Чем обусловлена высокая эффективность переноса теплоты тепловой трубой?
16. В какой части трубы происходит поглощение теплоты?



17. Что происходит в зоне испарения тепловой трубы? Что происходит в зоне конденсации?
18. Как осуществляется возврат сконденсированной жидкости в зону испарения?
19. Требуется ли затраты энергии (подвод электроэнергии) на перенос тепло-ты тепловой трубой?

## **Лабораторная работа №9**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЯ (СВП)**

**Цель работы:** Определение коэффициента полезного действия СВП. Определение скорости циркуляции воды.

#### **Общие сведения**

Электромагнитным излучением солнечная энергия передается через космическое пространство на поверхности Земли. Вся поверхность Земли получает от Солнца мощность около  $1, 2 \times 10^{17}$  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  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Для населенных районов в зависимости от места, времени суток и погоды потоки солнечной энергии меняются от 3 до  $30 \text{ МДж/м}^2$  в день.

В среднем для создания комфортных условий жизни требуется примерно 2 кВт энергетической мощности на человека, или примерно 170 МДж энергии в день.

Для характеристики солнечного излучения и взаимодействия его с веществом используются следующие основные величины.

**Поток излучения** - величина, равная энергии, переносимой электромагнитными волнами за одну секунду через произвольную поверхность. Измеряется в  $\text{Дж/с}=\text{Вт}$ .

**Плотность потока излучения (энергетическая освещенность)** – величина, равная отношению потока излучения к площади равномерно облучаемой им поверхности. Измеряется в  $\text{Вт/м}^2$ .

Плотность потока излучения от Солнца, падающего на перпендикулярную ему площадку вне земной атмосферы, называется **солнечной константой S**, которая равна  $1367 \text{ Вт/м}^2$ .

**Коэффициент поглощения  $\alpha$  (поглощательная способность)** тела – величина, измеряемая отношением потока излучения, заключенного в узком спектральном интервале частот, поглощаемого поверхностью тела, к потоку излучения, падающему на эту поверхность в том же спектральном интервале. Коэффициент поглощения зависит от температуры тела, частоты (или длины волны) излучения, а также от природы тела. Тело, для которого коэффициент поглощения

равен единице, называется абсолютно черным телом. Оно поглощает все падающее на него излучение. Близкой по оптическим свойствам к черному телу является сажа.

**Коэффициент отражения (отражательная способность) тела** - величина, равная отношению потока излучения, отраженного поверхностью тела, к падающему на эту поверхность потоку. Для поверхностей, которые рассеивают падающее солнечное излучение, эту величину также называют *альбедо*.

Поверхность	Альбедо
Водная поверхность	0, 03-0, 04
Поверхность суши	0, 15-0, 30
Снежный покров	0, 5-0, 6
Поверхность Земли (среднее значение)	0, 34

**Солнечные водоподогреватели (гелиоводоподогреватели).** Преобразование солнечной энергии в тепловую обеспечивается за счет способности атомов вещества поглощать электромагнитное излучение. При этом энергия электромагнитного излучения преобразуется в кинетическую энергию атомов и молекул вещества, то есть в тепловую энергию. Результатом этого является повышение температуры тела.

Для энергетических целей наиболее распространенным является использование солнечного излучения для нагрева воды в системах отопления и горячего водоснабжения.

Использование солнечной энергии в республике в настоящее время рассматривается по двум направлениям:

- гелиотепловое;
- гелиоэлектрическое.

Энергетическая программа Республики Беларусь до 2010 года предусматривает крупносерийное производство гелиоводоподогревательных установок, разработанных белорусскими учеными. Найденные ими технические решения делают их производство более технологичным и многократно снижают их вес. К 2010 году планируется их применение, обеспечивающее эквивалентную экономию 50 тыс. т. условного топлива в год.

Основным элементом солнечной нагревательной системы является приемник, в котором происходит поглощение солнечного излучения и передача энергии жидкости. Наиболее распространенными являются плоские (нефокусирующие) приемники, позволяющие собирать как прямое, так и рассеянное излучение и в силу этого способные работать также и в облачную погоду. С учетом также их относительно невысокой стоимости они являются предпочтительными при нагревании жидкостей до температур ниже 100 °С.

На рис.9.1 представлены различные варианты приемников солнечного излучения.

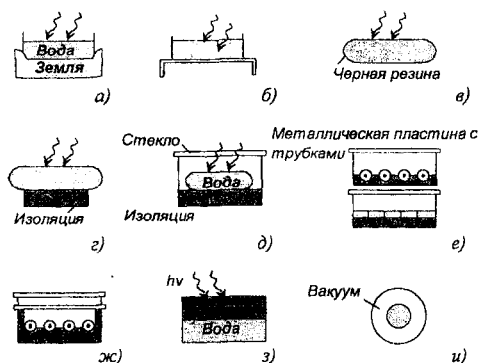


Рис. 9.1. Последовательность приемников солнечного излучения в порядке возрастания их эффективности и стоимости

Простые приемники (рис.9.1, а-д) содержат весь объем жидкости, которую необходимо нагреть.

Приемники более сложной конструкции (рис.9.2, е-и) нагревают за определенное время только небольшое количество жидкости, которая затем, как правило, накапливается в отдельном резервуаре, что позволяет снижать теплопотери системы в целом.

Остановимся кратко на характеристиках каждой из этих конструкций.

Рис.9.1 а) – *открытый резервуар на поверхности земли* (например, бассейн) – простейший возможный нагреватель воды. Повышение температуры воды ограничено высоким коэффициентом отражения поверхности воды, теплоотдачей к земле и воздуху, затратой части поглощенного тепла на испарение воды.

Рис.9.1 б) – *открытый резервуар, теплоизолированный от земли*. Повышение температуры воды ограничено высоким коэффициентом отражения поверхности воды, теплоотдачей к воздуху, затратой части поглощенного тепла на испарение воды.

Рис.9.1 в) – *черный резервуар*. Жидкость заключена в емкости с черной матовой поверхностью, обычно располагаемой на крыше здания. Потери тепла на испарение отсутствуют, коэффициент поглощения черной поверхности близок к единице. Нагреватели этого типа достаточно недороги, просты в изготовлении и позволяют нагревать воду до температуры около  $45^{\circ}\text{C}$ . Очень широкое распространение получили в Японии, Израиле. Параметры нагревателя ограничены тепловыми потерями с поверхности, особенно их увеличением в ветреную погоду.

Рис.9.1 г) – *черный резервуар с теплоизолированным дном*. Потери тепла в предыдущей конструкции можно уменьшить почти в два раза, если теплоизолировать дно приемника. Для достижения этого достаточно всего нескольких сантиметров изолирующего слоя, в качестве которого можно использовать практически любой пористый материал с размером пор до 10.2 мм.

Рис.9.1 д) – *закрытые черные нагреватели*. Для исключения теплоотдачи от приемника в воздух, особенно в ветреную погоду, емкость нагревателя поме-

щается в контейнер с прозрачной для солнечного излучения крышкой. Лучшим материалом для крышек является стекло. Используются также специальные покрытия из пластика, имеющие подобные стеклу оптические свойства, но менее хрупкие.

Рис.9.1 е) – *металлические проточные нагреватели*. В такой системе вода протекает по параллельным трубкам, закрепленным на зачерненной металлической пластине. Обычно диаметр трубок составляет около 2 см, расстояние между ними 20 см, толщина пластины 0,3 см. Пластину с трубками для защиты от ветра помещают в контейнер со стеклянной крышкой.

Характеристики проточного нагревателя могут быть улучшены за счет:

- уменьшения конвективного переноса между приемной пластиной и стеклянной крышкой, если над первой крышкой поместить еще одну дополнительную стеклянную крышку (рис.9.1, ж),

- уменьшения радиационных потерь от пластины, если ее поверхность делать не черной, а селективной, то есть сильно поглощающей, но слабо излучающей в определенной области спектра (рис.9.1, з),

- использования вакуумированных приемников, в которых заполненная жидкостью черная трубка помещается внутри наружной стеклянной трубки и в пространстве между ними создается вакуум. Вакуумирование исключает конвективный перенос тепла через наружную поверхность (рис.9.1, и).

Нагретую в проточном нагревателе жидкость можно использовать сразу или запастись. Скорость прокачки выбирают такой, чтобы температура воды повышалась примерно на 4°C при каждом проходе через нагреватель. Прокачка нагретой жидкости может осуществляться как принудительно (насосом) (рис.9.2), так и естественной циркуляцией (естественной конвекцией) (рис.9.3). В последнем случае нагреватель должен находиться ниже накопителя нагретой воды.

Системы с принудительной циркуляцией выгодны, поскольку для их создания можно использовать существующие водонагревательные системы, вводя в них приемник солнечного излучения и насос. Кроме того, в них нет необходимости располагать накопительную емкость выше приемника. Недостатком их является зависимость от электроэнергии, потребляемой насосом.

К системам с принудительной циркуляцией относятся многоконтурные (*n*-контурные) системы (рис.9.4). К достоинствам данных систем можно отнести использование в первом контуре в качестве рабочего тела вещества с низкой температурой замерзания (кристаллизации), что позволяет использовать их круглогодично.

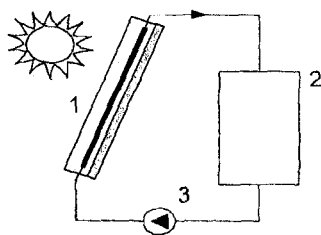


Рис.9.2. Нагревательная система с принудительной циркуляцией

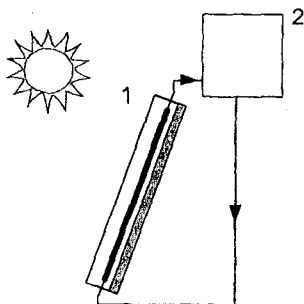


Рис.9.3. Нагревательная система с естественной циркуляцией

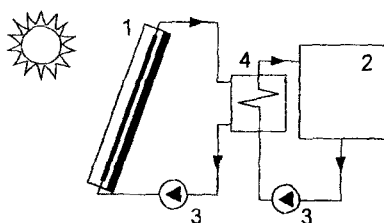


Рис.9.4. Двухконтурная нагревательная система с принудительной циркуляцией:  
 1 – приемник излучения; 2 – теплоизолированный резервуар;  
 3 – насос; 4 – теплообменник

СВП относится к наиболее простым устройствам утилизации энергии солнечного излучения (плотность излучения его, примерно,  $1 \text{ кВт/м}^2$ ). 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, анализ и эксперименты показывают, что солнечное излучение, даже когда солнце за облаками, позволяет в условиях Белоруссии в период с апреля по октябрь включительно, т.е. более полугод, обеспечивать бытовые потребности в горячей воде (с температурой  $50\text{--}80^\circ\text{C}$ ), имея солнечный водоподогреватель площадью  $1,5\text{--}2,5 \text{ м}^2$  на человека.

Любая поверхность, на которую попадают солнечные лучи, нагревается. Степень этого нагрева зависит от ориентации поверхности относительно потока лучей (максимально нагревается поверхность перпендикулярная этому потоку), поглощающей способности (степени черноты), потерь тепла, которые применительно к СВП следует разделить на полезные (нагрев воды) и вредные (потери тепла в окружающую среду).

Исключительная простота конструкции и исполнения позволяет изготавливать СВП самостоятельно любому человеку, имеющему элементарные трудовые навыки, из широкого набора доступных материалов.

Для того чтобы конструкция такого СВП оказалась эффективной, необходимо оценить влияние отдельных конструктивных элементов на служебные свойства – способность нагревать воду.

Эффективный СВП должен:

- 1) быть ориентирован относительно солнца;
- 2) иметь большую поглощающую способность воспринимающей излучение поверхности;
- 3) иметь минимальное термическое сопротивление при передаче тепла к воде от воспринимающей поверхности;
- 4) совершенную теплоизоляцию от окружающей среды.

В представленном в данной лабораторной работе СВП вышеперечисленные принципы на технически целесообразном уровне реализованы следующим образом:

- конструктивным наклоном воспринимающей поверхности СВП в соответствии с широтным расположением Белоруссии ( $\sim 60^\circ$ );
- черными матовыми воспринимающими поверхностями (степень черноты  $\sim 0,6$ );
- малой толщиной ( $\sim 0,3$  мм) стенок металлических каналов для воды и наличием перемещения воды в этих каналах за счет конвекции;
- слоем пенопласта ( $\sim 50$  мм) на тыльной стороне воспринимающей поверхности, воздушным промежутком ( $\sim 10$  мм) и стеклом (толщиной  $\sim 6$  мм) на лицевой стороне, деревянной рамой обрамляющей этот пакет.

### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис.9.5) состоит из описанной выше воспринимающей панели (1), водопроводящих резиновых трубок (2), соединяющих панель с бачком (3), расположенным сверху над панелью. Вода, благодаря нагреву ее в каналах панели и, следовательно, уменьшению плотности, движется вверх по этим каналам, попадает в бачок, а новые порции более холодной воды из бачка попадают в нижний штуцер панели. В центре объема бачка расположена термопара  $T-1$  (4), у входного штуцера панели установлена термопара  $T-3$  (5), а у выходного штуцера панели установлена термопара  $T-2$  (6).

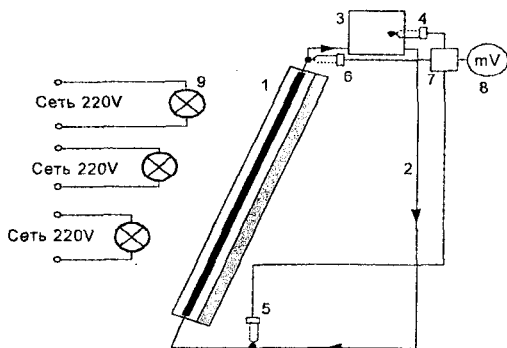


Рис. 9.5. Схема экспериментальной установки

Термопары  $T-1$ ,  $T-2$ ,  $T-3$  (хромель-копель) подходят к переключателю (7) и подключаются к измерительному прибору (8) по очереди.

В качестве имитатора солнечного излучения используются лампы с отражателями (9), комбинация включения которых задается преподавателем (система подключения ламп может быть снабжена измерителями для определения мощности излучателей).

### Определение коэффициента полезного действия СВП

$$\eta_{\text{СВП}} = \frac{Q_{\text{СВП}}}{Q_{\text{изл}}} \cdot 100\% , \quad (9.1)$$

где  $\eta_{\text{СВП}}$  – коэффициент полезного действия (КПД) СВП;

$Q_{\text{в}}$  – количество тепла запасенного водой СВП;

$Q_{\text{изл}}$  – количество тепла, полученного от излучателей.

Количество тепла, воспринимаемого СВП

$$Q_{\text{СВП}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{к}} , \quad (9.2)$$

где  $Q_{\text{в}}$  – количество тепла, воспринятого водой;

$Q_{\text{к}}$  – количество тепла, воспринятого элементами конструкции СВП, соприкасающихся с водой (для реально используемых СВП, имеющих бак-накопитель, объем которого многократно превышает объем воспринимающих панелей, работающих в установившемся режиме в течение светового дня, величиной  $Q_{\text{к}}$  можно пренебречь).

В лабораторной установке  $Q_{\text{к}}$  определяется методом заливки известного количества горячей воды известной температуры и измерением равновесной температуры системы, когда  $\Delta Q_{\text{в}} = \Delta Q_{\text{к}}$ .

$$c_a m_a (t_{\text{зал}} - t_p) = \sum_{i=1}^k c_i m_i (t_p - t_{\text{нач}}), \quad (9.3)$$

откуда

$$\sum_{i=1}^k c_i m_i = c_a m_a \frac{(t_{\text{зал}} - t_p)}{(t_p - t_{\text{нач}})}, \quad (9.4)$$

где  $c_i$  – удельная теплоемкость  $i$ -того элемента конструкции СВП;

$m_i$  – масса  $i$ -того элемента конструкции СВП;

$c_a$  – удельная теплоемкость воды 4187 Дж/(кг·К);

$m_a$  – масса воды (10 кг);

$t_{\text{зал}}$  – температура заливки горячей воды;

$t_p$  – равновесная температура;

$t_{\text{нач}}$  – начальная температура.

Величина  $\sum_{i=1}^k c_i m_i$  определена предварительно и равна 39,321 кДж/кг

$$\Delta T = t_{\text{кон ср}} - t_{\text{нач ср}}, \quad (9.5)$$

$$Q_a = c_a m_a (t_{\text{кон ср}} - t_{\text{нач ср}}), \quad (9.6)$$

$$Q_x = \sum_{i=1}^k c_i m_i \cdot \Delta t, \quad (9.7)$$

поэтому  $Q_{\text{СВП}}$  можно выразить

$$Q_{\text{СВП}} = (c_a m_a + \sum_{i=1}^k c_i m_i) (t_{\text{кон ср}} - t_{\text{нач ср}}). \quad (9.8)$$

$Q_{\text{изл}}$  можно получить по формуле при известном  $\eta_{\text{изл}}$

$$Q_{\text{изл}} = \eta_{\text{изл}} N \tau_p, \quad (9.9)$$

где  $N$  – электрическая мощность 3-х излучателей равна 1500 (500×3)Вт;

$\eta_{\text{изл}}$  – коэффициент полезного действия излучателя;

$\tau_p$  – время выполнения работы

$\eta_{\text{изл}}$  – можно определить по формуле

$$\eta_{\text{изл}} = \frac{\Phi_{\text{изл}}}{N} \cdot 100\%, \quad (9.10)$$

где  $\Phi_{\text{изл}}$  – поток излучения (площадь поверхности СВП  $S=1,43 \text{ м}^2$ ), Вт;

$N$  – номинальная электрическая мощность светильников (излучателей) при напряжении  $U=220\text{В}$  равна 500 Вт. Так как светильники могут быть подключены либо к сети 220В, либо к сети 127В, то при напряжении  $U=127\text{В}$  необходимо определить значение мощности светильников, учитывая, что сопротивление одного светильника  $R=100 \text{ Ом}$  по закону Ома определить силу тока, а по формуле  $N=U \cdot I$  – мощность.



## Порядок выполнения работы

1. Включить излучатели (светильники), Зафиксировать время начала эксперимента.
2. Измерить при помощи термопар  $T_1, T_2$  и  $T_3$  и милливольтметра начальные относительные температуры, и определить температуры  $\Delta T$  с помощью градуировочной таблицы (Приложение 2), а также абсолютные температуры  $T$ , прибавив к относительным температурам комнатную:  $T = T_k + \Delta T$ . Полученные данные занести в табл. 9.1

$$t_{нач\ ср} = \frac{T_{1нач} + T_{2нач} + T_{3нач}}{3} \quad (9.11)$$

3. Люксметром измерить величину освещенности на поверхности СВП в 15 точках. Полученные данные занести в таб. 9.1
4. На основании этих данных рассчитать среднюю освещенность СВП  $\bar{E}$ .
5. Найти световой поток

$$\Phi = \bar{E} \cdot S; \quad (9.12)$$

(площадь поверхности СВП  $S = 1,43 \text{ м}^2$ ). Полученное значение занести в табл.

- 9.1
6. Найти поток излучения. Полученное значение занести в табл. 9.1

$$\Phi_{изл} = \frac{\Phi}{217}, \text{ Вт.} \quad (9.13)$$

7. Найти КПД излучателя по формуле (9.10). Полученное значение занести в табл. 9.1

Таблица 9.1

Освещенность $E$ , лк	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
Средняя освещенность $E_{ср}$ , лк		
Расчетное значение светового потока $\Phi_{св.п.}$ , лм		
Поток излучения $\Phi_{изл}$ , Вт		
КПД источника света $\eta_{изл}$ , %		

8. В течении  $\tau_p = 60$  мин через каждые 10 мин ( $\tau$ ) производить замеры температур  $T_1, T_2, T_3$ . Результаты занести в табл. 9.2. По полученным данным построить графики зависимости  $T_1 = f(\tau); T_2 = f(\tau); T_3 = f(\tau)$ .
9. По последним показаниям термопар определить среднее значение конечных температур  $t_k$  аналогично п.1.

$$t_{\text{ср}} = \frac{T_{1к} + T_{2к} + T_{3к}}{3} \quad (9.14)$$

10. Вычислить количество энергии, поглощенной СВП, по формуле (9.8).
11. Вычислить количество энергии, поступающей от излучателей, по формуле (9.9).
12. Вычислить КПД СВП по формуле (9.1).

Таблица 9.2

№ п/п	$\tau$ , мин	$T_1$		$T_2$		$T_3$		$T_{\text{ос}}$ , °C
		мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	
13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.
1	0							
2	10							
3	20							
4	30							
5	40							
6	50							
7	60							

В системе СВП содержится объем  $V = 10$  л воды.

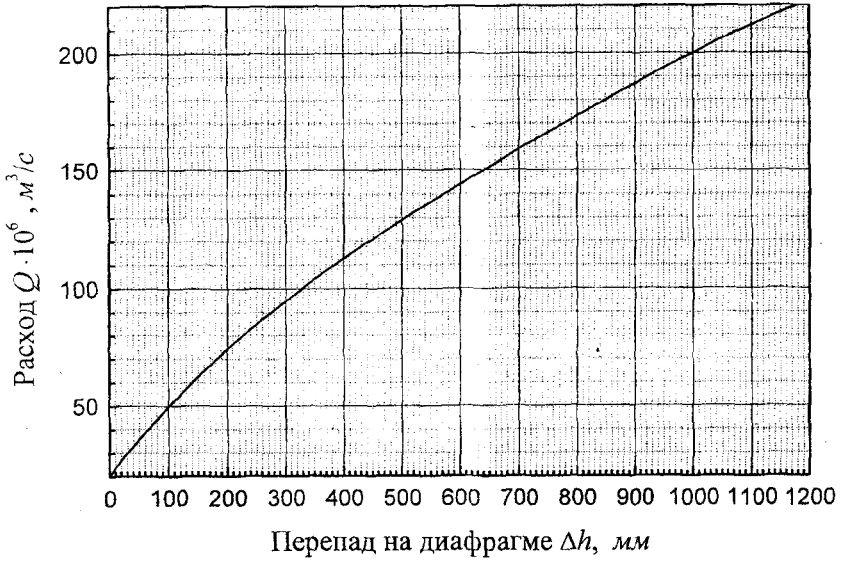
### Контрольные вопросы по лабораторной работе № 9

1. Что позволяет обеспечить нагрев воды в гелиоводоподогревателе (СВП) до температур выше 50°C?
2. Что такое КПД СВП?
3. Что такое кратность циркуляции в СВП.?
4. Типы СВП.
5. Какие преимущества и недостатки имеет СВП с естественной циркуляцией?
6. Каковы достоинства и недостатки СВП с принудительной циркуляцией?
7. Что такое концентраторы энергии СВП?
8. Каково потребление тепловой энергии на подогрев воды в РБ?
9. Какова продолжительность эффективной работы СВП в течение года в РБ?
10. Расчетная потребность горячей воды на человека?

## Литература

1. Дж. Твайделл, А. Уэйр. Возобновляемые источники энергии. М., Энергоатомиздат, 1990.
2. Курс лекций «Основы энергосбережения». Под ред. Хутской Н.Г. Мн, Технология, 1999.
3. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М., 1981.
4. Кондратьев К. Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. Л., Гидрометеоздат, 1956.
5. Закон Республики Беларусь об энергосбережении. Энергоэффективность. - 1998. №7.
6. Государственная научно-техническая программа "Энергосбережение". Мн., 1996.
7. Вторичные тепло энергоресурсы и охрана окружающей среды В.В.Харитонов и др.; Под ред. ВВ. Харитонова: Мн., Выш. школа, 1988.
8. Драгун В,Л., Конев С.В. Тепловые насосы, В мире тепла Мн., Наука и техника, 1991.
9. Рэи Д., Макмаикл Д. Тепловые насосы.- М., Энергоиздат, 1982
10. Марочкин В.К., Баилук Н Д., Брилевский М.Ю. Использование вторичных топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве. Мн., Ураджай, 1989.
11. Кондратьев К. Я. Актинометрия. Л., Гидрометеоздат, 1965.
12. Емцов Б.Т. Техническая гидромеханика. Л.,Машиностроение, 1987.
13. Лабораторный практикум по курсу «Основы энергосбережения». Под ред. В.Г. Баштового. Мн, БГПА, 2000.
14. Кириленко А.И, Янцевич И.В. Методическое пособие «Энергоэффективное освещение». Мн, БГПА, 2000.
15. Камке Д., Крамер К. Физические основы единиц измерения. М., 1980.

Тарировочная кривая для определения расхода воды  
по перепаду давления на диафрагме



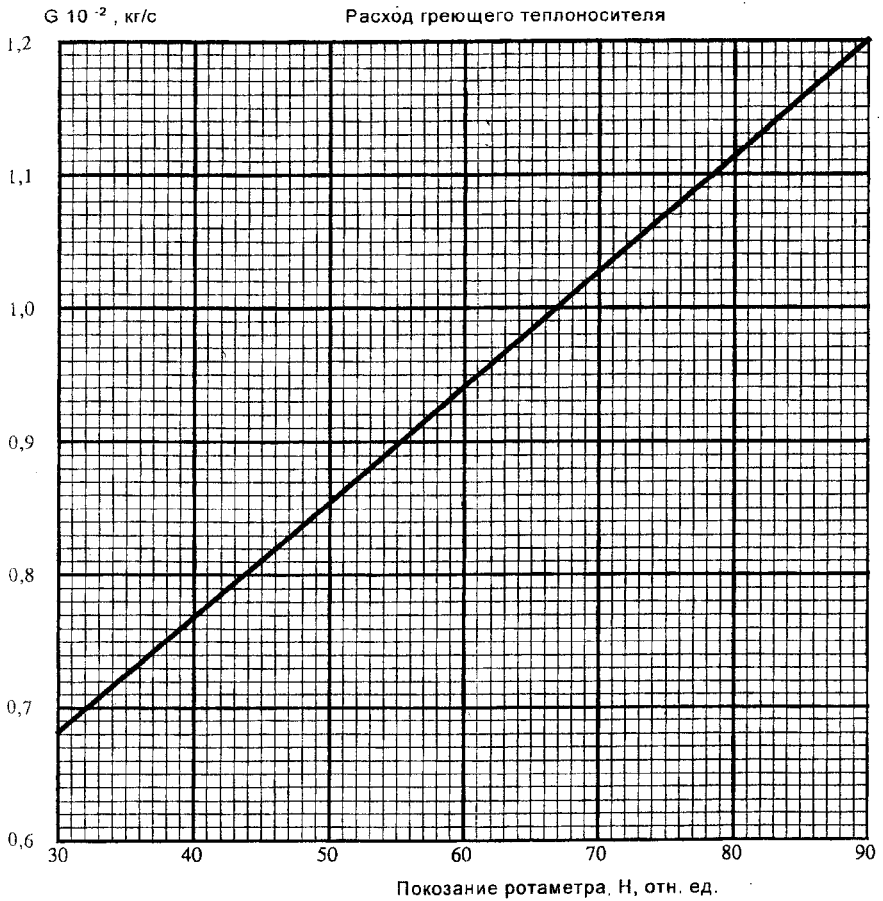
Градуировочная таблица для термопар.  
Термопара «хромель-копель»

Температура рабочего конца °С	ТермоЭДС, мВ, температура, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-90	-5,146	-5,196	-5,246	-5,296	-5,346	-5,396	-5,445	-5,494	-5,543	-5,592
-80	-4,634	-4,686	-4,738	-4,790	-4,841	-4,892	-4,943	-4,994	-5,045	-5,096
-70	-4,106	-4,160	-4,213	-4,266	-4,319	-4,372	-4,425	-4,478	-4,530	-4,582
-60	-3,562	-3,617	-3,672	-3,727	-3,782	-3,836	-3,890	-3,945	-3,999	-4,052
-50	-3,003	-3,059	-3,116	-3,172	-3,228	-3,284	-3,340	-3,396	-3,451	-3,507
-40	-2,429	-2,487	-2,545	-2,603	-2,660	-2,718	-2,775	-2,832	-2,889	-2,946
-30	-1,841	-1,901	-1,960	-2,019	-2,078	-2,137	-2,196	-2,254	-2,313	-2,371
-20	-1,240	-1,301	-1,361	-1,422	-1,482	-1,542	-1,602	-1,662	-1,722	-1,782
-10	-0,626	-0,688	-0,750	-0,812	-0,873	-0,935	-0,996	-1,057	-1,118	-1,179
0	0	-0,063	-0,126	-0,189	-0,252	-0,315	-0,377	-0,440	-0,502	-0,564
0	0	0,063	0,127	0,190	0,254	0,318	0,381	0,445	0,509	0,574
10	0,638	0,702	0,767	0,832	0,896	0,961	1,026	1,091	1,157	1,222
20	1,287	1,353	1,418	1,484	1,550	1,616	1,682	1,748	1,815	1,881
30	1,947	2,014	2,081	2,148	2,214	2,282	2,349	2,416	2,483	2,551
40	2,618	2,686	2,753	2,821	2,889	2,957	3,025	3,094	3,162	3,260
50	3,299	3,367	3,436	3,505	3,574	3,643	3,712	3,781	3,850	3,920
60	3,989	4,059	4,128	4,198	4,268	4,338	4,408	4,478	4,548	4,619
70	4,689	4,760	4,830	4,901	4,972	5,042	5,113	5,184	5,255	5,327
80	5,398	5,469	5,541	5,612	5,684	5,756	5,828	5,899	5,971	6,043
90	6,116	6,188	6,260	6,333	6,405	6,478	6,550	6,623	6,696	6,769
100	6,842	6,915	6,988	7,061	7,135	7,208	7,281	7,355	7,429	7,502
110	7,576	7,650	7,724	7,798	7,872	7,946	8,021	8,095	8,169	8,244
120	8,318	8,393	8,468	8,543	8,618	8,693	8,768	8,843	8,918	8,993
130	9,069	9,144	9,220	9,295	9,371	9,446	9,522	9,598	9,674	9,750
140	9,826	9,902	9,979	10,055	10,131	10,208	0,284	10,361	10,438	10,514
150	10,591	10,688	10,745	10,822	10,899	10,976	1,054	11,131	11,208	11,286
160	11,363	11,441	11,519	11,596	11,674	11,752	1,830	11,908	11,986	12,064
170	12,142	12,221	12,299	12,377	12,456	12,534	2,613	12,692	12,770	12,849
180	12,928	13,007	13,086	13,165	13,244	13,323	3,403	13,482	13,561	13,641
190	13,720	13,800	13,879	13,959	14,039	14,119	4,199	14,278	14,359	14,439

## Свойства насыщенных паров фреона-12

Температура		Давление абсолютное	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре
			жидкость	пар	жидкость	пар	жидкость	пар		жидкость	пар	
$t$	$T$	$p$	$v'$	$v''$	$\rho'$	$\rho''$	$h'$	$h''$	$r$	$s'$	$s''$	
°С	К	бар	дм <sup>3</sup> /кг	м <sup>3</sup> /кг	кг/дм <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
-10	263,15	2,1910	0,7018	0,07813	1,425	12,80	409,47	568,89	159,39	4,15280	4,75859	0,60597
-9	264,15	2,2700	0,7032	0,07558	1,422	13,23	410,39	569,32	158,93	4,15624	4,75809	0,60181
-8	265,15	2,3520	0,7047	0,07313	1,419	13,68	411,27	569,78	158,51	4,15963	4,75759	0,59796
-7	266,15	2,4353	0,7062	0,07078	1,416	14,13	412,19	570,24	158,05	4,16302	4,75704	0,59402
-6	267,15	2,5215	0,7077	0,06852	1,413	14,60	413,11	570,74	157,63	4,16645	4,75658	0,59013
-5	268,15	2,6088	0,7092	0,06635	1,410	15,08	414,03	571,21	157,17	4,16984	4,75612	0,58628
-4	269,15	2,6999	0,7107	0,06427	1,407	15,57	414,95	571,67	156,71	4,17323	4,75562	0,58238
-3	270,15	2,7928	0,7127	0,06226	1,403	16,07	415,87	572,13	156,25	4,17663	4,75516	0,57853
-2	271,15	2,8870	0,7143	0,06028	1,400	16,59	416,84	572,63	155,79	4,18006	4,75478	0,57472
-1	272,15	2,9857	0,7158	0,05844	1,397	17,11	417,76	573,09	155,33	4,18341	4,75432	0,57091
0	273,15	3,0857	0,7173	0,05667	1,394	17,65	418,68	573,55	154,87	4,18680	4,75394	0,56714
1	274,15	3,1882	0,7189	0,0596	1,391	18,20	419,60	574,01	154,41	4,19019	4,75348	0,56329
2	275,15	3,2934	0,7205	0,05330	1,388	18,76	420,56	574,47	153,91	4,19354	4,75302	0,55948
3	276,15	3,4006	0,7220	0,05166	1,385	19,35	421,49	574,93	153,45	4,19693	4,75265	0,55571
4	277,15	3,5112	0,7241	0,05012	1,381	19,95	422,45	575,39	152,94	4,20028	4,75227	0,55199
5	278,15	3,6244	0,7257	0,04863	1,378	20,56	423,37	575,85	152,48	4,20363	4,75189	0,54826
6	279,15	3,7398	0,7273	0,04721	1,375	21,18	424,33	576,31	151,98	4,20702	4,75152	0,54449
7	280,15	3,8587	0,7289	0,04583	1,372	21,82	425,30	576,77	151,48	4,21037	4,75118	0,54081
8	281,15	3,9797	0,7310	0,04450	1,368	22,47	426,22	577,19	150,98	4,21372	4,75080	0,53708
9	282,15	4,1044	0,7326	0,04323	1,365	23,13	427,18	577,65	150,47	4,21707	4,75043	0,53336
10	283,15	4,2301	0,7342	0,04204	1,362	23,79	428,14	578,11	149,97	4,22042	4,75013	0,52971
11	284,15	4,3606	0,7358	0,04086	1,359	24,48	429,14	578,53	149,43	4,22377	4,74976	0,52599

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12	285,15	4,4354	0,7380	0,03970	1,355	2,19	430,07	578,99	148,92	4,22712	4,74946	0,52235
13	286,15	4,6296	0,7396	0,03858	1,352	25,92	431,03	579,41	148,38	4,23043	4,74909	0,51866
14	287,15	4,7681	0,7413	0,03751	1,349	26,66	431,99	579,83	147,84	4,23378	4,74875	0,51498
15	288,15	4,9108	0,7435	0,03648	1,345	27,41	433,00	580,33	147,33	4,23708	4,74842	0,51133
16	289,15	5,0553	0,7452	0,03547	1,342	28,18	433,96	580,71	146,75	4,24043	4,74812	0,50769
17	290,15	5,2041	0,7468	0,03449	1,339	28,99	434,92	581,17	146,24	4,24378	4,74783	0,50405
18	291,15	5,3549	0,7491	0,03354	1,335	29,87	435,93	581,59	145,65	4,24709	4,74750	0,50041
19	292,15	5,5086	0,7507	0,03263	1,332	30,65	436,89	582,01	145,11	4,25040	4,74720	0,49764
20	293,15	5,6669	0,7524	0,03175	1,329	31,50	437,90	582,47	144,57	4,25371	4,74691	0,49321
21	294,15	5,5883	0,7547	0,03089	1,325	32,38	438,86	582,84	143,98	4,25705	4,74662	0,48960
22	295,15	5,9930	0,7570	0,03005	1,321	33,28	439,87	583,26	143,40	4,26036	4,74633	0,48596
23	296,15	6,1610	0,7587	0,02925	1,318	34,19	440,83	583,64	142,81	4,26363	4,74604	0,48236
24	297,15	6,3335	0,7605	0,02848	1,315	35,11	441,83	584,06	142,23	4,26694	4,74575	0,47880
25	298,15	6,5080	0,7628	0,02773	1,311	36,07	442,84	584,52	141,68	4,27024	4,74549	0,47524
26	299,15	6,6857	0,7645	0,02700	1,308	37,04	443,84	584,90	141,05	4,29993	4,74519	0,47164
27	300,15	6,8666	0,7669	0,02629	1,304	38,04	444,85	585,27	140,43	4,27686	4,74486	0,46800
28	301,15	7,0542	0,7692	0,02560	1,300	39,06	445,85	585,69	139,84	4,28012	4,74457	0,46444
29	302,15	7,2435	0,7710	0,02494	1,297	40,10	446,86	586,07	139,21	4,28339	4,74427	0,46088
30	303,15	7,4344	0,7734	0,02433	1,293	41,11	447,86	586,49	138,62	4,28674	4,74406	0,45732
31	304,15	7,6321	0,7758	0,02371	1,289	42,18	448,87	586,82	137,96	4,29000	4,74369	0,45368
32	305,15	7,8352	0,7782	0,02309	1,285	43,31	449,87	587,20	137,33	4,29327	4,74339	0,45012
33	306,15	8,0417	0,7800	0,02250	1,282	44,45	450,88	587,58	136,70	4,29649	4,74306	0,44656
34	307,15	8,2461	0,7825	0,02192	1,278	42,62	451,92	587,95	136,03	4,29980	4,74281	0,44301
35	308,15	8,4596	0,7849	0,02136	1,274	46,81	452,93	588,29	135,36	4,30311	4,74251	
40	313,15	9,5818	0,7968	0,01882	1,255	53,13	458,08	590,09	132,01	4,31940	4,74097	
45	318,15	10,810	0,8104	0,01656	1,234	60,38	463,31	591,72	128,41	4,33568	4,73933	
50	323,15	12,147	0,8244	0,01459	1,213	68,56	468,54	593,10	124,56	4,35189	4,73741	
55	328,15	13,600	0,8410	0,01316	1,189	75,98	474,16	595,07	120,91	4,36876	4,73728	
60	333,15	15,182	0,8568	0,01167	1,167	5,69	479,68	596,58	116,90	4,38509	4,73850	
65	338,15	16,883	0,8741	0,01036	1,114	96,52	485,33	597,96	112,63	4,40142	4,73452	

Тарифовочная кривая для определения расхода воды  
по показаниям ротаметра



Учебное издание

## ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Лабораторные работы (практикум)  
для студентов технических специальностей

Составители:

БАШТОВОЙ Виктор Григорьевич  
ВОЛКОВ Юрий Анатольевич  
КЛИМОВИЧ Сергей Викторович и др.

Технический редактор М.И. Гриневич  
Компьютерная верстка Е.А. Занкевич

---

Подписано в печать 12.09.2005.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 200. Заказ 270.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0056957 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.