

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ  
АКАДЕМИЯ  
Республиканский образовательный центр  
Кафедра ЮНЕСКО "Энергосбережение и возобновляемые источники энергии"

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)  
по курсу «Основы энергосбережения»  
для студентов технических специальностей

Минск 2000

## **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. 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 кВт/м<sup>2</sup>. Для населенных районов в зависимости от места, времени суток и погоды потоки солнечной энергии меняются от 3 до 30 МДж/м<sup>2</sup> 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 МДж/м<sup>2</sup> в день, то требуемую для одного человека энергию можно получить со 100 м<sup>2</sup> площади земной поверхности. При средней плотности населения в городах 500 человек на 1 км<sup>2</sup> на одного человека приходится 2000 м<sup>2</sup> 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** - Вт/м<sup>2</sup>.

Плотность потока излучения от Солнца, падающего на перпендикулярную ему площадку вне земной атмосферы, называется *солнечной константой S*, которая равна 1367 Вт/м<sup>2</sup>.

**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  $4,6 \cdot 10^{-3}$  Вт (или 1 Вт = 217 лм).

**Освещенность** - величина, равная отношению светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности. Освещенность измеряется в люксах (лк). 1 лк = 1 лм/м<sup>2</sup>. Для белого света 1 лк =  $4,6 \cdot 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup> (или 1 Вт/м<sup>2</sup>=217 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 (фотоЭДС). 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 падающего на элемент потока излучения к максимальной мощности вырабатываемой им электрической энергии. 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 p-n -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 - противоотражательное покрытие; 7 - лицевой контакт; 8 - соединительный проводник к тыльному контакту следующего элемента. Характерный размер солнечного

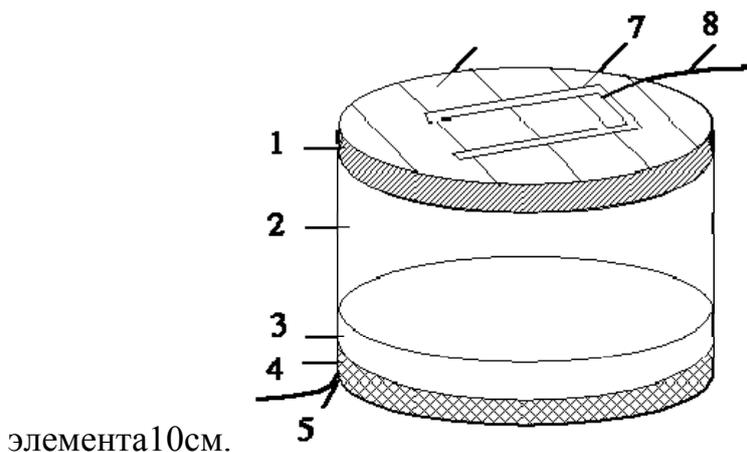


Рис. 1.1. Структура солнечного элемента

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

1.2.

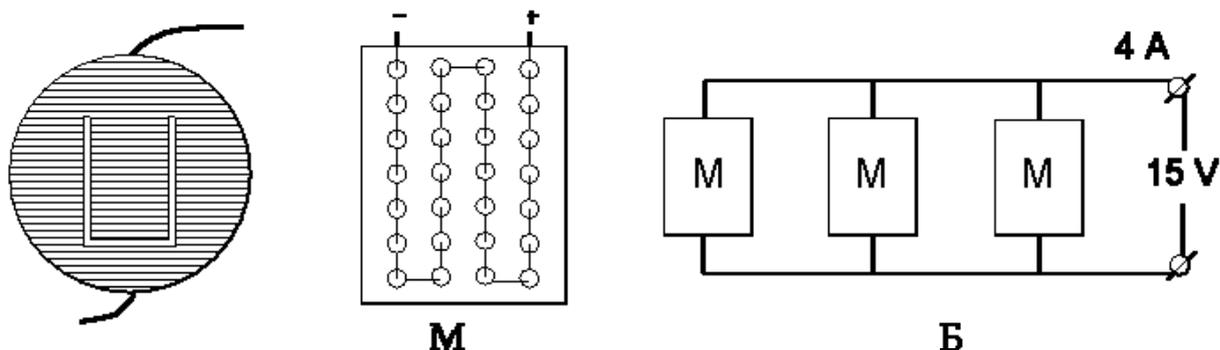


Рис. 1.2. Э - солнечный элемент; М - солнечный модуль; Б - солнечная батарея

В 1958 году 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.

За последние годы мировая продажа солнечных модулей составила по суммарной мощности 25 МВт в 1986 году и около 60 МВт - в 1991 году. Полная стоимость солнечных элементов с 1974 по 1984 год упала примерно со 100 до 4 долларов США на 1 Вт максимальной мощности. Предполагается снижение этой величины до 0,8 долларов США. Однако даже при полной стоимости солнечных элементов 4 доллара США на 1 Вт плюс вспомогательной аппаратуры 2 доллара США на 1 Вт при облученности местности  $20 \text{ МДж/м}^2$  в день и долговечности солнечных батарей 20 лет стоимость вырабатываемой ими электроэнергии составляет примерно 16 центов США за 1 кВт/ч (4,4 цента за МДж). Это вполне конкурентоспособно с электроэнергией, вырабатываемой дизель-генераторами, особенно в отдаленных районах, где стоимость доставки топлива и обслуживания резко возрастает. Ожидается, что в ближайшие несколько лет солнечные батареи будут широко использоваться развивающимися странами в сельских местностях в осветительных системах и системах водоснабжения.

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

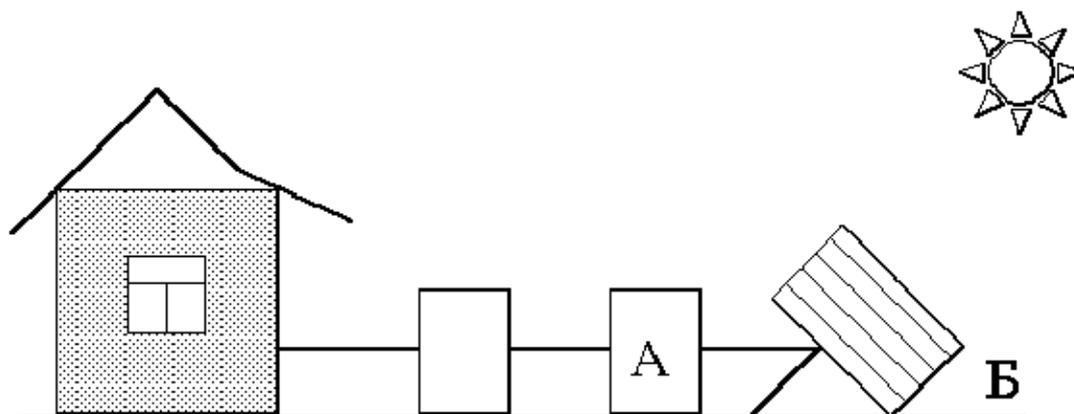


Рис. 1.3. Солнечная энергетическая установка

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

Экспериментальная установка (рис. 1.4) включает в себя: 1 – солнечный модуль, состоящий из 36-ти (9x4) 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.

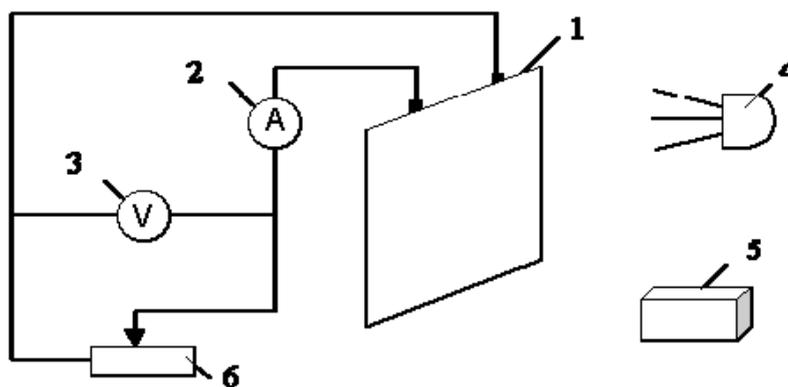


Рис. 1.4. Схема экспериментальной установки

### Порядок выполнения работы

а). Исследование характеристик холостого хода солнечного элемента.

1. Удостовериться, что нагрузка на солнечный модуль отсоединена.

2. Установить источник света на прямое излучение на поверхность солнечного модуля (нулевая отметка на лимбе источника).
3. Включить источник света.
4. Люксметром измерить освещенность  $E$  в центре ( $E_{ц}$ ) и в четырех крайних точках поверхности ( $E_1, E_2, E_3, E_4$ ) солнечного модуля и вычислить ее среднее значение ( $E_{ср}$ ).
5. По показаниям вольтметра определить вырабатываемую солнечным элементом ЭДС.
6. Прodelать аналогичные измерения при косом падении излучения на поверхность модуля, поворачивая источник света на 10, 20, 30, 40, 50 градусов по лимбу.
7. Вычислить плотность потока излучения  $W$  (энергетическую освещенность), используя соотношения между лк и  $Вт/м^2$  для белого света,  $W = 4,6 \cdot 10^{-3} E_{ср}$ .
8. Вычислить ЭДС, вырабатываемую одним солнечным элементом ЭДС-1, разделив ЭДС на число элементов 36.
9. Все результаты занести в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 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	$W$ , $Вт/м^2$	ЭДС-1, В
0									
10									
20									
30									
40									
50									

10. Построить график зависимости ЭДС солнечного модуля от плотности потока излучения, падающего на его поверхность  $W$ .

б). Определение вольт-амперной 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  $W_{\text{Э}}=I U$ .
6. Все данные занести в табл. 1.2.

Т а б л и ц а 1.2

Плотность потока излучения, Вт/м <sup>2</sup>	Номер измерения	Напряжение $U$ , В	Ток $I$ , А	Мощность $W_{\text{Э}}$ , Вт

7. Построить вольт-амперную 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, вырабатываемой солнечным модулем.

## **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  $4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$  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  $1 \text{ м}^2$  поверхности равномерно распределен световой поток в 1 люмен.

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

**Тепловое излучение** – наиболее распространенный вид излучения. При этом потери атомами или молекулами энергии на излучение света компенсируются за счет энергии 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 исходит из сравнительно небольшого числа центров люминесценции – атомов, молекул или ионов, приходящих в возбужденное состояние под воздействием внешних причин, а затем, при переходе возбужденного центра на более низкий энергетический уровень, испускающих квант люминесцентного излучения. 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. Использование этого принципа обуславливает основные недостатки ламп накаливания, а именно:

– 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 и газонаполненными. В последних используется аргон с добавлением 12-15 % азота.

Разновидностью ламп накаливания являются *галогенные лампы*, 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 спирали со стенок колбы лампы на тело накала.

*Люминесцентная лампа* представляет собой запаянную с обоих концов стеклянную трубку, внутренняя поверхность которой покрыта тонким слоем люминофора. Из лампы откачан воздух, и она заполнена инертным газом аргоном при очень низком давлении. В лампу помещена капля ртути, которая при нагревании превращается в ртутные пары. Вольфрамовые электроды лампы, как правило, имеют вид спирали. Параллельно спирали располагаются два жестких никелевых электрода, каждый из которых соединен с одним из концов спирали. При подаче на электроды напряжения в газовой среде лампы возникает электрический разряд, в частности между жесткими электродами и спиралью.

В цилиндрическом баллоне ртутной лампы идет электрический разряд. Возбужденные атомы ртути испускают мощные потоки электромагнитного излучения, основная энергия которого лежит в ультрафиолетовой части спектра. Под действием ультрафиолетового излучения происходит свечение покрытых люминофором стенок лампы разным цветом. Поглощая ультрафиолетовое излучение, смесь люминофоров излучает в видимой части спектра и в достаточной степени воспроизводит спектр дневного света.

## ***Снижение потребления электроэнергии***

### ***при повсеместном внедрении люминесцентных ламп***

В странах СНГ не менее 10 % вырабатываемой электроэнергии потребляется при освещении жилых и непроизводственных служебных помещений лампами накаливания. С учетом вышеизложенного их повсеместная замена в указанных помещениях люминесцентными лампами позволит снизить требуемое количество вырабатываемой электроэнергии на 7 %. В частности, для Республики Беларусь при этом в абсолютных числах ежегодная экономия электроэнергии будет составлять не менее 4 млрд. кВт ч.

## Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 2.1) включает в себя: 1 – лампу накаливания; 2 – люминесцентную лампу, работающую с частотой 35 000 Гц; 3 – ваттметр для измерения электрической мощности, потребляемой лампами из сети; 4 – выключатели; 5 – прибор для измерения освещенности люксметр.

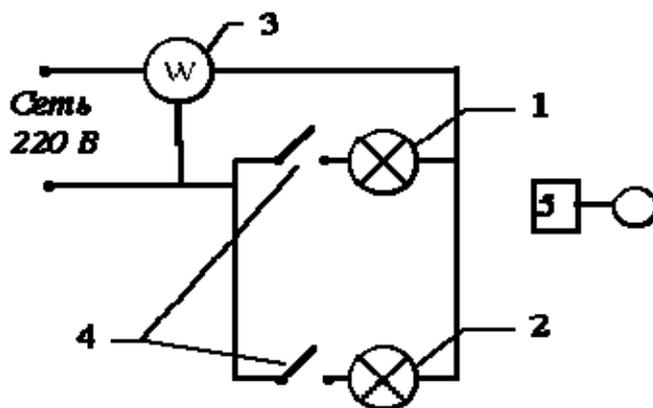


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки

## Порядок выполнения работы

1. Установить диапазон измерений люксметра 0–2500 лк.
2. Включить лампу накаливания. Люксметром 5 измерить величину освещенности на поверхности включенного светильника в 5 точках.
3. По ваттметру 3 определить величину потребляемой лампой накаливания мощности из сети.
4. Выключить лампу накаливания.
5. Включить люминесцентную лампу и произвести для нее аналогичные измерения.
6. Полученные данные занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметры	Включенный электрический источник света	
	лампа накаливания	люминесцентная лампа, работающая на частоте 35000 Гц

Освещенность $E$ (лк) на поверхности светильника, в точках	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
Расчетное значение освещенности $\bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5}{5}, \text{ лк}$			
Расчетное значение светового потока $\Phi = \bar{E} \cdot S$ , лм			
Поток излучения $\Phi_{\text{изл}} = \frac{\Phi}{217}, \text{ Вт}$			
Потребляемая мощность $N$ , Вт			
КПД источника света $\eta = \frac{\Phi_{\text{изл}}}{N} \cdot 100\%$			
Плотность потока излучения (энергетическая освещенность) $E_{\text{эн}} = \frac{\Phi_{\text{изл}}}{S}, \text{ Вт/м}^2$			

7. Измерить диаметр  $d$  (м) и высоту  $h$  (м) цилиндрического светильника и

определить его поверхность 
$$S = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d h, \text{ м}^2.$$

8. По результатам расчетов сделать вывод об экономичности рассмотренных источников света и целесообразности их использования

**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: резким расширением, резким сужением, резким и плавным поворотами 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**  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) и средней по сечению трубы **скоростью**  $V$  (м/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. Расход и скорость связаны между собой соотношением  $Q = VS$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения трубы (м<sup>2</sup>).

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**  $\Delta P_{\text{пот}} = \rho \Delta E$  и **потери напора**  $\Delta h_{\text{пот}} = \Delta P_{\text{пот}} / \rho g = \Delta E / g$ , где  $\rho$  - плотность жидкости либо газа;  $g$  - ускорение свободного падения. 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

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

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 ( $\Delta p_{\text{л}}$ ) 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:

$$\Delta p_{\text{полн}} = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{л}},$$

$$\Delta h_{\text{полн}} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{л}}.$$

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

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

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 видно, что величина потерь напора по длине возрастает с увеличением скорости потока и длины трубы и уменьшается с увеличением диаметра трубопровода.

Местные потери определяются по формуле

$$\Delta h_{\text{л}} = \zeta \frac{v^2}{2g},$$

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.

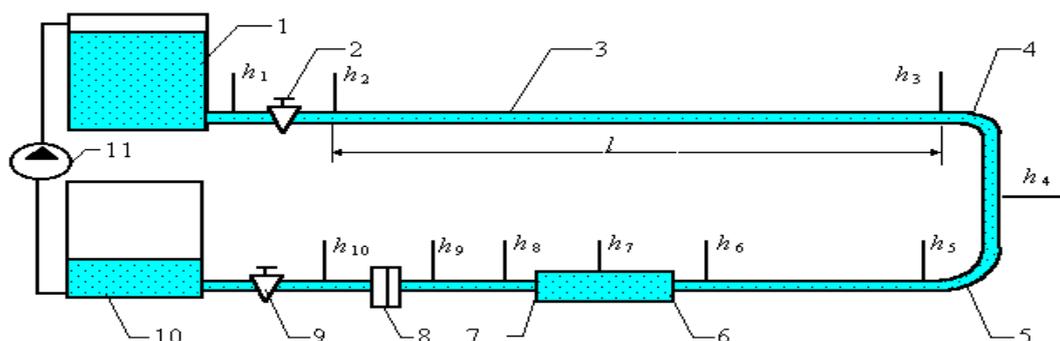


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки.

Длина магистрального участка трубопровода  $l = 1,7$  м; диаметр  $d = 1,6 \cdot 10^{-2}$  м;  
плотность воды -  $1000$  кг/м<sup>3</sup>

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.

**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 определяется по разности  $\Delta h_{9,10}$  показаний пьезометров  $h_9$  и  $h_{10}$  ( $\Delta h_{9,10} = h_9 - h_{10}$ ) и тарировочному 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.
5. После выполнения работы закрыть вентили 2 и 9 и отключить насос.

Т а б л и ц а 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 тарировочной кривой определить расход воды для всех 7 опытов. Данные занести в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

№ опыта		1	2	3
Расход, м <sup>3</sup> /с				
Средняя скорость, м/с				
Входной вентиль	$\Delta h_{1,2}$ , м			
	$N_{1,2}$ , Вт			
Магистральный трубопровод	$\Delta h_{2,3}$ , м			
	$N_{2,3}$ , Вт			
Резкий поворот на 90°	$\Delta h_{3,4}$ , м			
	$N_{3,4}$ , Вт			
Плавный поворот на 90°	$\Delta h_{4,5}$ , м			
	$N_{4,5}$ , Вт			
Резкое расширение	$\Delta h_{6,7}$ , м			
	$N_{6,7}$ , Вт			
Резкое сужение	$\Delta h_{7,8}$ , м			
	$N_{7,8}$ , Вт			

Диафрагма	$\Delta h_{9,10}$ , м			
	$N_{9,10}$ , Вт			

3. Определить среднюю скорость воды в трубопроводе  $V = 4Q/\pi d^2$ .
4. Для каждого значения скорости потока вычислить потери напора по длине  $\Delta h_{2,3} = h_2 - h_3$  и на отдельных участках трубопровода (местных сопротивлениях) в соответствии с табл. 3.2.
5. Мощность, затрачиваемая на преодоление каждого из гидравлических сопротивлений, определяется по формуле  $N = \rho g \Delta h_{\text{пот}} Q$ .
6. Провести сравнительный анализ потерь энергии на каждом из участков сложного трубопровода. Обратит внимание на влияние скорости течения на потери энергии.

## 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.

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 теплонасосными 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, передаваемая горячему источнику, кДж/кг (теплота, передаваемая в систему отопления помещения);

$l$  – удельная работа, подводимая от внешнего источника, кДж/кг.

Можно записать

$$q_1 = q_2 + l.$$

Величина  $\varepsilon = q_1 / l$

называется коэффициентом преобразования или отопительным коэффициентом цикла. Этот коэффициент характеризует эффективность цикла теплового насоса.

Рабочий цикл теплового насоса представлен на рис. 4.1.

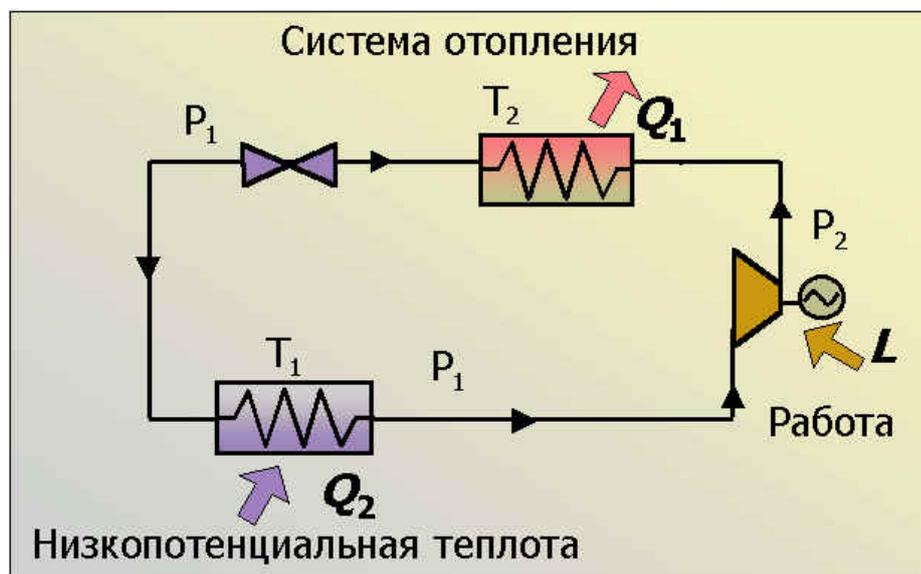


Рис. 4.1. Рабочий цикл теплового насоса

Низкопотенциальная теплота  $Q_2$  поступает в испаритель теплового насоса, где ее воспринимает рабочее тело (хладагент), циркулирующее в цикле. Источником низкопотенциальной теплоты могут быть наружный воздух, природные водоемы, грунт, питьевая вода, промышленные стоки, вентиляционные выбросы и т.д. В качестве хладагентов в циклах используются теплоносители с низкой температурой кипения – углекислота, аммиак, фреоны. Хладагент поступает в испаритель в жидком состоянии. В процессе подвода теплоты  $Q_2$  к жидкому хладагенту происходит его превращение в пар (при постоянном давлении и температуре). Пары хладагента поступают в компрессор, где сжимаются, повышается их давление и температура. При сжатии в компрессоре от внешнего источника (электродвигателя) подводится работа  $L$ . 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 низкопотенциального источника. Цикл замыкается.

#### Экспериментальная установка

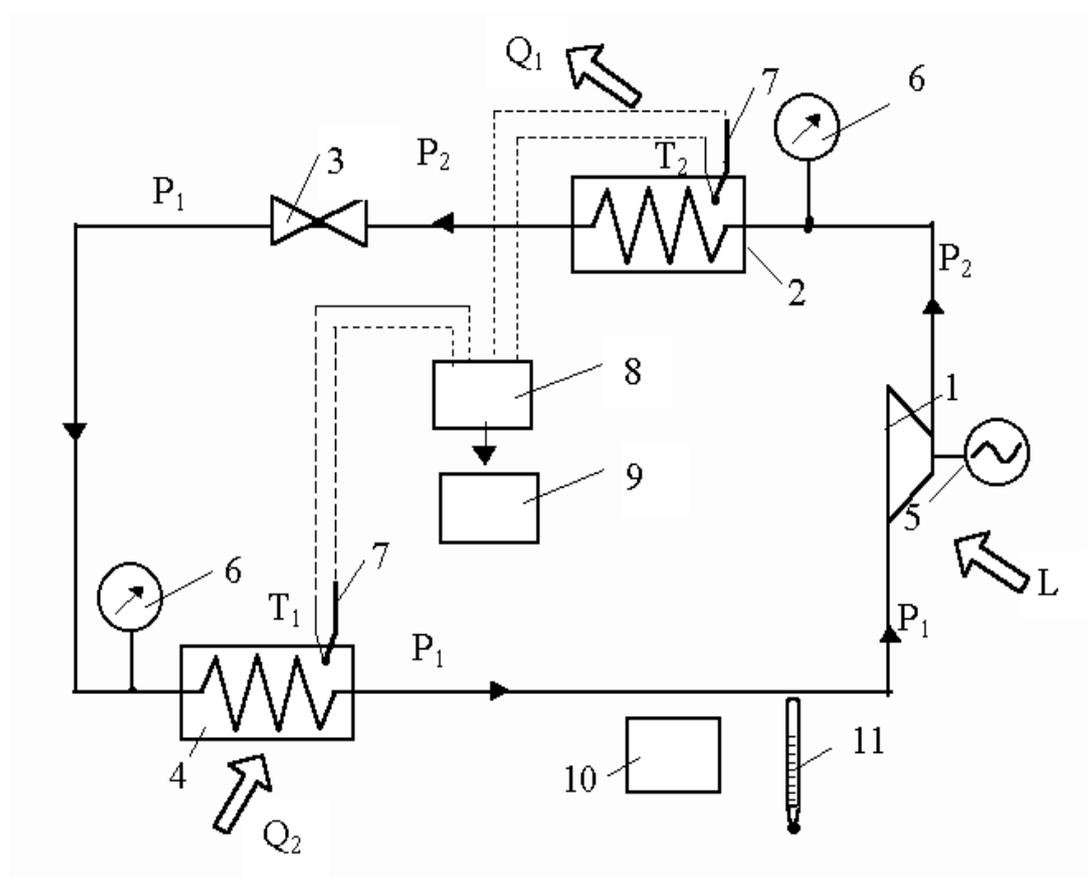


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

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. Выйти на стационарный режим, о котором свидетельствует неизменность показаний манометров.
3. Измерить при помощи манометров давление за компрессором и за дроссельным вентилем перед испарителем.
4. Измерить атмосферное давление барометром.
5. Измерить температуру окружающей среды термометром.
6. При помощи термопар и милливольтметра измерить температуры в конденсаторе и испарителе в милливольтках и, пользуясь градуировочной таблицей, перевести их в градусы Цельсия с учетом поправки на холодный спай термопар (к табличному значению температуры в °С прибавить температуру окружающей среды).
7. Через 3 минуты повторить измерения.
8. Выключить установку из сети.

**Таблица 4.1**

№ пп	$P_{1\text{ман}}$ ати	$P_{2\text{ман}}$ ати	$P_1$ , МПа	$P_2$ , МПа	$t_1$ , мВ	$t_2$ , мВ	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$V$ , Па	$t_{\text{oc}}$ , °С
1										
2										

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

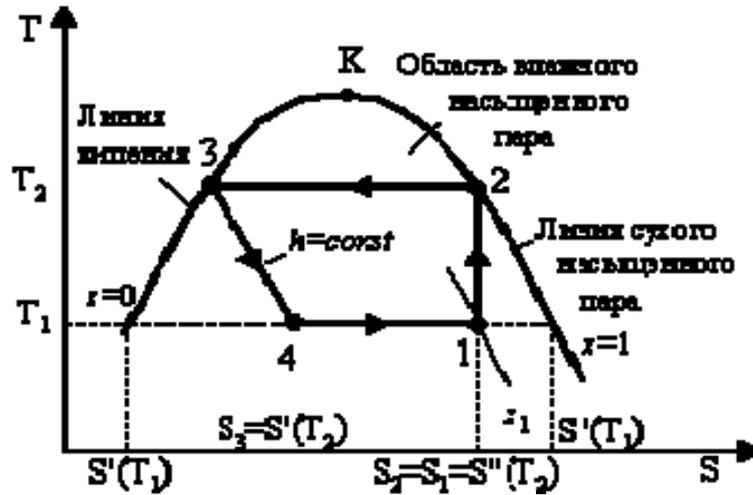


Рис. 4.3. Цикл теплового насоса:

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) (см. приложение) 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.

Таблица 4.2

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

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

### Методика расчета

Манометры измеряют избыточное давление (давление, превышающее атмосферное). Для определения абсолютного давления следует воспользоваться формулой

$$P = B + P_{ман},$$

где  $B$  - атмосферное давление, измеренное барометром.

Соответственно

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

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

(1 МПа =  $10^6$  Па.)

Определив температуры  $t_1$  и  $t_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и давления  $P_1$  и  $P_2$ , воспользуемся таблицей теплофизических свойств фреона-12.

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

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

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

Точка 3 лежит на линии кипения:

$$h_3 = h'_{(t_2)}, \text{ кДж/кг};$$

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

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  $0,9 \dots 1$  (для проверки). Тогда

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

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  $l_u = q_1 - q_2 = h_2 - h_1$ , кДж/кг.

В процессе дросселирования работа не производится, поэтому работа цикла равна работе компрессора. Мощность компрессора  $N = 0,200$  кВт.

Расход хладагента  $G = N / l_u$ , кг/с, где  $N$  – кВт;  $l_u$  – кДж/кг.

Количество теплоты, отдаваемое конденсатором в систему отопления помещения:  $Q_1 = q_1 \cdot G$ , кВт.

Количество низкопотенциальной теплоты, подведенное из окружающей среды к испарителю:  $Q_2 = q_2 \cdot G$ , кВт.

Отопительный коэффициент  $\varepsilon = q_1 / l_u$ .

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.

Градуировочная таблица для термопар.

Термопара “хромель-копель”

Температура рабочего конца °C	ТермоЭДС, мВ, температура, °C									
	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	10,284	10,361	10,438	10,514
150	10,591	10,688	10,745	10,822	10,899	10,976	11,054	11,131	11,208	11,286
160	11,363	11,441	11,519	11,596	11,674	11,752	11,830	11,908	11,986	12,064
170	12,142	12,221	12,299	12,377	12,456	12,534	12,613	12,692	12,770	12,849
180	12,928	13,007	13,086	13,165	13,244	13,323	13,403	13,482	13,561	13,641
190	13,720	13,800	13,879	13,959	14,039	14,119	14,199	14,278	14,359	14,439

ПРИЛОЖЕНИЕ

Температура		Давление абсолютное	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре
			жидкость	пар	жидкость	пар	жидкость	пар		жидкость	пар	
$t$	$T$	$p$	$v'$	$v''$	$r'$	$r''$	$h'$	$h''$	$r$	$s'$	$s''$	
°C	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/(кгК)
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	0,50628
-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

Свойства насыщенных паров фреона-12

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	85,69	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	

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

**Цель работы:** определение эффективности водо-водяного рекуперативного теплообменника, экспериментальное нахождение коэффициента теплопередачи, сравнение прямого 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).

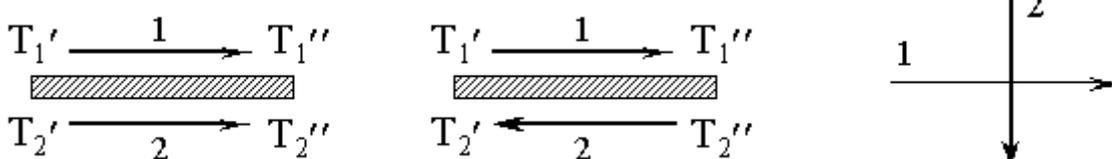
**Теплообменными аппаратами** называются устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой. По принципу действия теплообменные аппараты могут быть разделены на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

*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: прямоток (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.



а)

б)

в)

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

$$Q = G_{гор} \bar{C}P_{гор} \Delta T_{гор} = G_{хол} \bar{C}P_{хол} \Delta T_{хол} \quad (5.1)$$

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;  $\bar{C}P_{гор} = \bar{C}P_{хол} = 4187 \frac{Дж}{кг \cdot K}$ ;

$\Delta T_{гор}$  и  $\Delta T_{хол}$  – изменения температур горячей и холодной воды.

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

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:

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

где  $K$  – коэффициент теплопередачи от одного теплоносителя к другому, Вт/(м<sup>2</sup> К).

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

*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 есть 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

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

### 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).

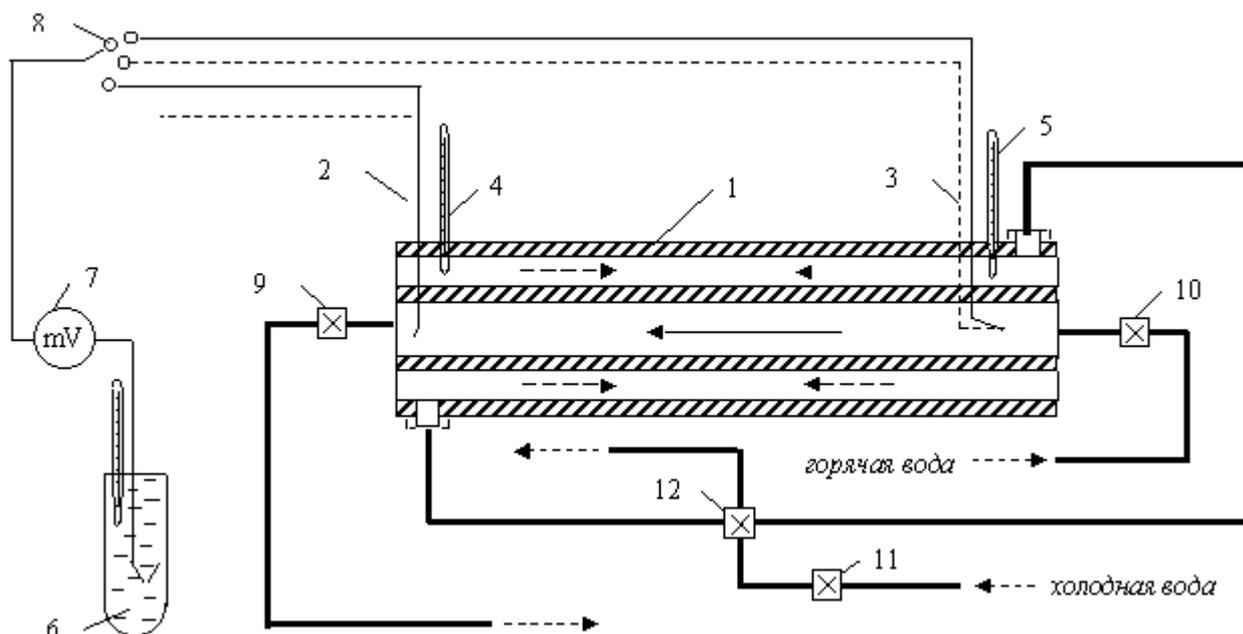


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки

Для определения температур горячей воды на входе и выходе из теплообменника установлены термопары 2, 3; холодной воды – термометры 4 и 5. Холодные спаи термопар должны быть помещены в сосуд Дьюара 6, температура которого измеряется ртутным термометром. ЭДС термопар регистрируется цифровым вольтметром 7, подключенным через переключатель термопар 8.

Расход горячего теплоносителя, протекающего через теплообменник, измеряется с помощью ротаметра 9. Регулирование расхода теплоносителей осуществляется вентилями 10 и 11. Переключение схемы с прямоточной на противоточную производится с помощью вентиля 12.

### Порядок выполнения работы

Установка включается по прямоточной схеме, для чего вентиль 12 ставится в положение “прямоток”. Открываются вентили 10 и 11 и в теплообменник при предельных расходах подается горячая и холодная вода. При достижении стационарного теплового режима, о наступлении которого судят по установившимся показаниям цифрового вольтметра 7, приступают к измерению температур и расходов теплоносителей. С этой целью через равные промежутки времени (3–5 минут) снимаются показания цифрового вольтметра, термопар и ротаметров. Затем вентиль 12 ставится в положение “противоток” и опыт повторяется в той же последовательности, что и при прямотоке.

Результаты измерений вносятся в таблицу 5.1.

Схема подключения	№ пп	$T_{гор}^{вх}$	$T_{гор}^{вых}$	$T_{х.с.}$	$T_{гор}^{вх}$	$T_{гор}^{вых}$	$T_{хол}^{вх}$	$T_{хол}^{вых}$	Н, мм	$G_{гор}$ , кг/с
		мВ	мВ	°С	°С	°С	°С	°С		
Прямоток	1									
	2									
	3									
Сред. знач.										
Противоток	1									
	2									
	3									
Сред. знач.										

### Обработка экспериментальных данных

Определяются средние значения параметров для каждого режима (прямотока и противотока). Температура горячего теплоносителя определяется по градуировочной таблице плюс температура холодных спаев термопар (поправка на холодный спай). Расход горячего теплоносителя по тарировочной кривой определяется по показаниям ротаметра.

Количество теплоты, переданной от одного теплоносителя к другому, определяется из выражения (5.1). Средние температуры теплоносителей определяются по формуле (5.3), и по формуле (5.2) определяется коэффициент теплопередачи  $K$  при различных схемах движения теплоносителя.

Эффективность аппарата находится по формуле (5.4).

### Выводы

Полученные экспериментальным путем численные значения коэффициентов теплопередачи необходимо сравнить для прямоточной и противоточной схем, пояснить преимущество противоточной схемы по сравнению с прямоточной. Сделать вывод о целесообразности применения того или иного теплообменника.

## Лабораторная работа № 6

### ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

#### (сравнительное исследование тепловой трубы)

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

#### Задачи работы:

- изучение механизмов переноса тепловой энергии;
- изучение принципа действия и конструкции тепловых труб;
- экспериментальное определение коэффициента теплопроводности тепловой трубы и сравнение его с коэффициентом теплопроводности медного стержня;
- изучение основных способов практического применения тепловых труб.

#### Общие положения

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:

$$\lambda = Q / (F \Delta \tau \text{ grad } T) \quad (6.1)$$

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

$$\text{grad } t = \vec{n}_o \frac{\partial t}{\partial n} \quad (6.2)$$

где  $\vec{n}_o$  - единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры;  $\frac{\partial t}{\partial n}$  - производная от температуры по нормали  $n$ .

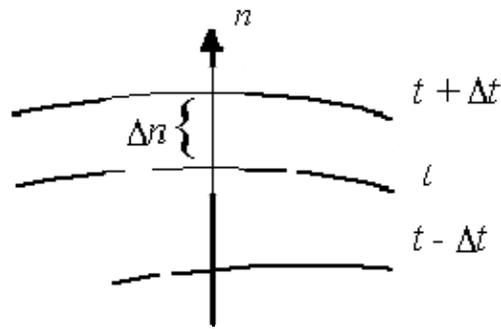


Рис. 6.1. Направление вектора градиента температур

В соответствии со своим определением коэффициент теплопроводности имеет размерность  $\text{Дж}\cdot\text{м}/\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К}=\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ .

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.

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 году. 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 преобразования), которое переносится паром к другому более холодному концу трубы, где пар конденсируется и отдает поглощенную теплоту. 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), по которому под действием капиллярных сил и происходит обратное движение жидкости.

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

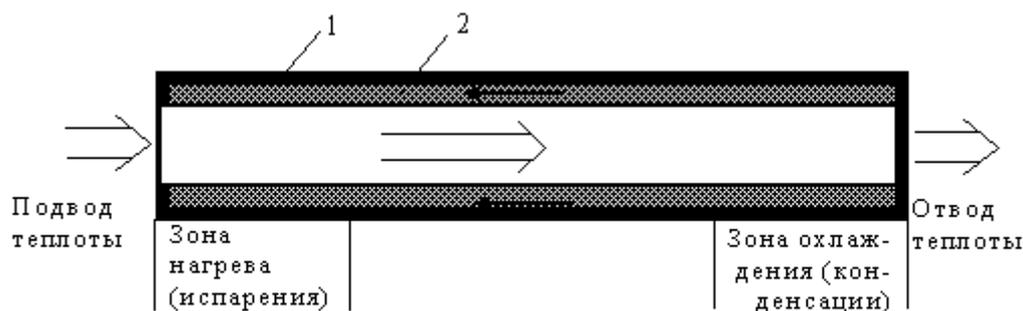


Рис. 6.2. Принципиальная схема тепловой трубы:

1 – корпус; 2 – капиллярно-пористый слой (фитиль); → – направление движения пара (направление переноса теплоты); ← – направление движения жидкости (конденсата)

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 труб составляет от нескольких миллиметров до десятка сантиметров, длина – до нескольких метров. Для изготовления корпусов и капиллярных структур (фитилей) используются стекло, керамика, различные металлы и сплавы. В качестве жидкости-теплоносителя используются как легко испаряемые жидкости (ацетон, аммиак, фреоны) для низкотемпературных труб, так и вода, ртуть, индий, цезий, калий, натрий, литий, свинец, серебро, висмут и неорганические соли для труб, работающих при высоких температурах.

Наиболее характерными областями применения тепловых труб являются энергетика, машиностроение, электроника, 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 1 тепловая труба 5 и медный стержень 6 одинаковой длины  $l$  и диаметра  $d$ . На нижних концах трубы и стержня установлены электрические нагреватели 2 одинаковой мощности, на которые подается электрическое напряжение от блока питания 9. Выделяемая на нагревателях тепловая мощность  $W$  измеряется вольтметром ( $U$ ) и амперметром ( $I$ ) 8, и находится  $W = I \cdot U$ . Верхние концы тепловой трубы и стержня находятся в холодильнике 11 и охлаждаются проточной водопроводной водой. По длине трубы и стержня установлены по три термопары 4 (две по концам и одна в центре), определяющие температуры в соответствующих точках. Показания термопар через коммутационные устройства 7 регистрируются измерителем малых ЭДС – самопишущим потенциометром КСП-4 и выводятся на печать.

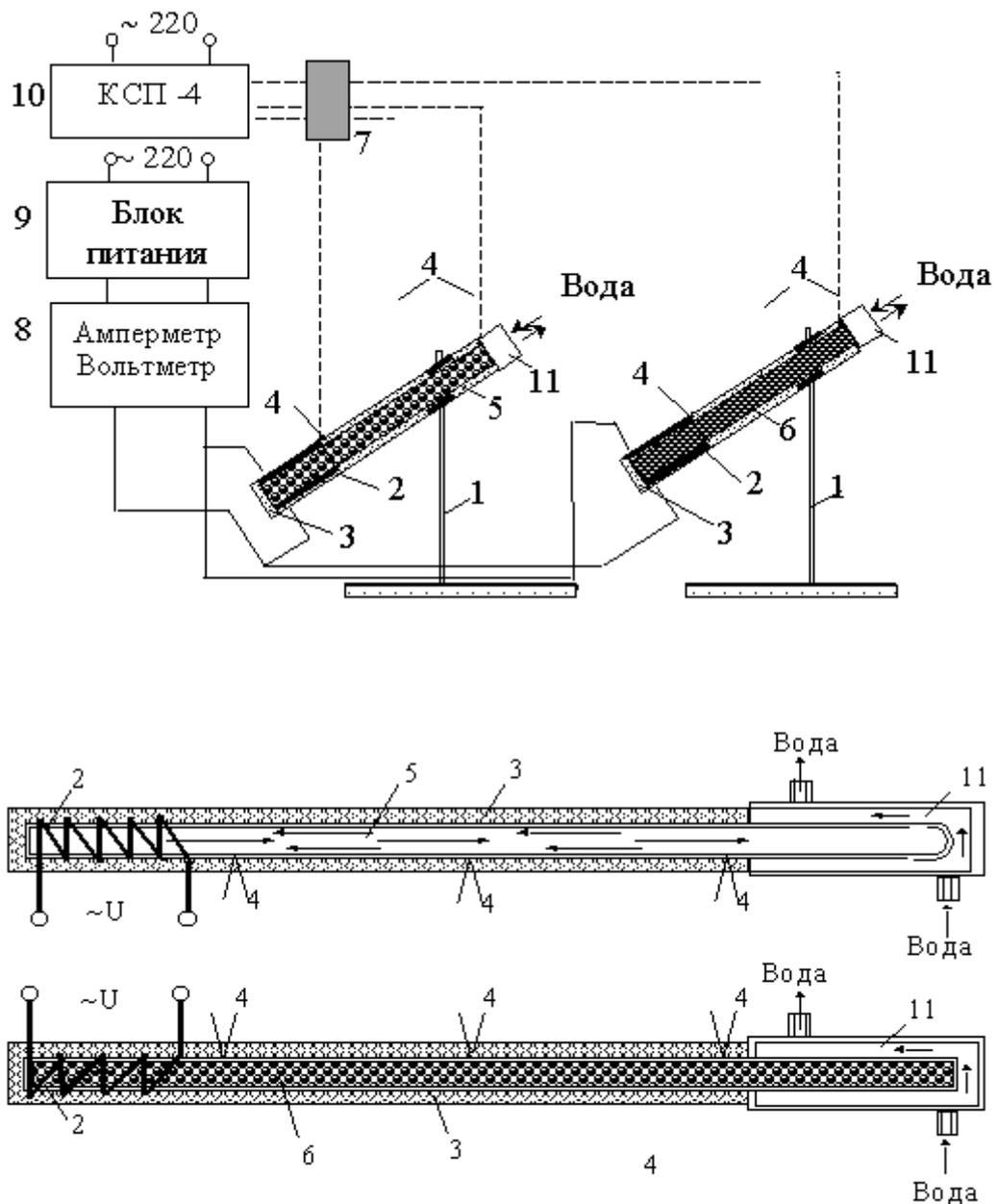


Рис. 6.3. Схема лабораторной установки:

а) тепловая труба; б) медный стержень;

1 – стойка (штатив); 2 – электрический нагреватель; 3 – теплоизоляция; 4 – датчики температуры (термопары); 5 – тепловая труба; 6 – медный стержень; 7 – коммутатор; 8 – вольтметр и амперметр; 9 – блок питания; 10 – измеритель малых ЭДС (самопишущий потенциометр КСП-4); 11 – холодильник

### 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  $W$  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 можно считать такой режим, при котором 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.

Через каждые 2 минуты (до выхода на стационарный режим) снимать показания потенциометра и заносить их в табл. 6.1.

Т а б л и ц а 6.1

	Тепловая труба			Медный стержень		
Мощность нагревателя, Вт	$W_C = \frac{UI}{2}$			$W_{TT} = \frac{UI}{2}$		
Номера термопар	1	2	3	4	5	6
Время, мин.	Показания термопар, °С					
2						
4						
...						
12						
$\lambda$ , 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  $Q$ , передаваемое через поперечное сечение тепловой трубы и медного стержня в единицу времени, равно мощности нагревателей  $W$ :  $Q/\Delta \tau = W$ .

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

$$\lambda = W / (F \text{ grad } t), \text{ где } \text{grad } t = \Delta t / L .$$

1. Используя экспериментальные данные, вычислить по этим формулам коэффициенты 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). Убедиться, что тепловая труба значительно быстрее выходит на стационарный режим работы.
3. Построить график распределения температур по длине тепловой трубы и медного стержня в стационарном режиме по показаниям всех термопар. 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 медного стержня и термопар 4 и 6 для тепловой трубы.
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,  $F = \pi d^2 / 4$ .

## Литература:

1. Д а н П.Д., Р э й Д.А. Тепловые трубы.– М.: Энергия, 1979. – 272 с.
2. В а с и л ь е в Л.Л. Теплообменники на тепловых трубах. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 143 с.
3. Низкотемпературные тепловые трубы/Под ред. Л.Л.Васильева.– Мн: Наука и техника, 1976. – 133 с.
4. Х а р и т о н о в В.В., Г о л у б е в В.М., О в ч и н н и к о в В.М., Л и х о д и е в с к и й В.Л. Вторичные теплоэнергоресурсы и охрана окружающей среды. – Мн: Выш. школа, 1988. – 181 с.

## Л а б о р а т о р н а я р а б о т а № 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 году интерес к таким установкам резко возрос. Большая часть существующих ветроустановок построена в конце 1970-х–начале 1980-х годов 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 электрической 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 энергетики 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  $F$ , 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  $F_H$  (рис. 7.1).

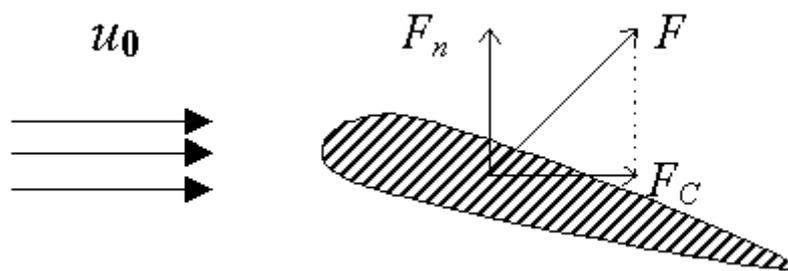


Рис. 7.1. Силы, действующие на тело, обтекаемое потоком газа

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).

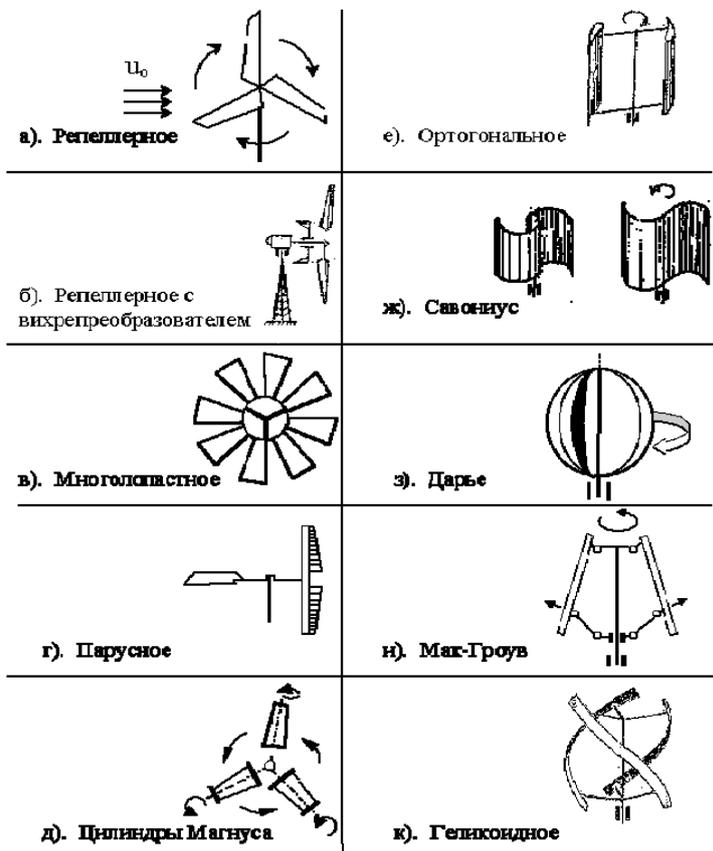


Рис. 7.2. Типы ветряных колес

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*  $S$  (для горизонтально-осевых ветроколес), то есть площадью, покрываемой его лопастями при вращении и равной  $S = \pi D^2/4$ , где  $D$  – диаметр ветроколеса, либо *площадью лобового сопротивления* (для вертикально-осевых ветроколес)  $S = h b$ , 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.

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 1 установлено ветроколесо 4 с электрическим генератором 5. К генератору подключена нагрузка 6. В цепь нагрузки подключены также вольтметр 7 и амперметр 8.

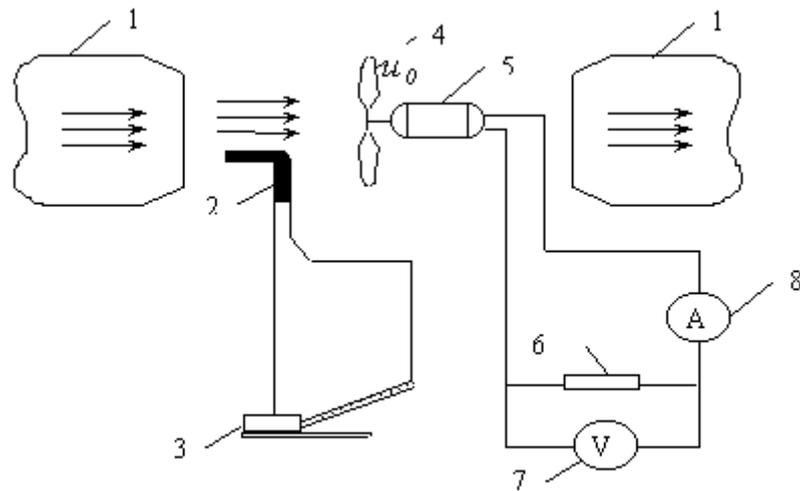


Рис. 7.3. Схема экспериментальной установки

### 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 6.
6. Изменить величину скорости воздушного потока в аэродинамической трубе. Произвести все вышеуказанные измерения.
7. Заменить ветроколесо. Выполнить измерения, описанные в пп. 3–6.

Т а б л и ц а 7.1

Тип ветроколеса	№	Показания микроманометра	$u_0$ ,	Параметры генератора	$C_N$

	опыта			м/с	ветроустановки			
		$l_0$ , мм	$l$ , мм		$U$ , В	$I$ , А	$N$ , Вт	

### Обработка экспериментальных данных

1. Вычислить скорость потока воздуха  $u_0$  по формуле

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

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  $N = UI$ .
3. Определить коэффициент мощности ветроколеса  $C_N = 2N/(S\rho u_0^3)$ .
4. Сравнить коэффициенты мощности различных типов ветроколес при разных скоростях воздушного потока. Провести анализ полученных результатов.

Составители.  
В.Г. Баштовой, Д.Л. Жив- Е.В. Кравченко,  
А.Г. Рекс, Н.Г. Хутская, И.В. Янцевич

Рецензент В.Л. Драгун

Учебное издание

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по курсу «Основы энергосбережения»  
для студентов технических специальностей

Составители: БАШТОВОЙ Виктор Григорьевич  
ЖИВ Дмитрий Львович  
КРАВЧЕНКО Евгений Владимирович и др.

\_\_\_\_\_ редактор Н.А. Шкільникова \_\_\_\_\_

Подписано в печать 30.06.99

Формат 60x84 1/16. Бумага ТИП №2. Офсет печать

\_\_\_\_\_ Усл. печ. л. 3,0. Уч. изд. л. 2,2. Тираж 150. Зак 285. \_\_\_\_\_

Издатель и полиграфическое исполнение.

Белорусская государственная политехническая академия.

Лицензия ЛВ № 155 от 30.01.99. 220027, Минск, пр. Ф. Скорины, 65.

© В.Г. Баштовой, Д.Л. Жив, Е.В. Кравченко и др.,  
составление, 2000