



Санкт-Петербургский  
государственный  
университет

Научный парк



*Образовательный ресурсный центр по направлению физика  
Первая физическая лаборатория*

**И.Л. Волков**

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОГО НАСОСА**

**Учебно-методическое пособие  
(описание лабораторной работы)**

**№ 19**

Санкт-Петербург

2014

УДК 536.72, 536.2

*Рецензенты:* д. ф.-м. н., профессор С.В. Карпов, д. ф.-м. н., профессор И.Ч. Машек.

Рекомендовано к печати Ученым советом физического факультета СПбГУ (выписка из протокола № 11 заседания Ученого совета физического факультета СПбГУ от 15.10.2013 г.).

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов СПбГУ младших курсов естественно-научных направлений обучения, а также может быть полезно учащимся и преподавателям средних и средне-специальных учебных заведений.

Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению физика Научного парка СПбГУ (<http://researchpark.spbu.ru>).

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Некоторые вопросы теории теплового насоса .....	6
1.1. Общие принципы работы теплового насоса.....	6
1.2. Принцип работы и функции расширительного клапана .....	8
2. Методика проведения эксперимента.....	11
2.1. Описание экспериментальной установки .....	11
2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений .....	12
3. Техника безопасности по работе с приборами.....	15
4. Порядок выполнения лабораторной работы .....	16
4.1. Подготовка экспериментальной установки к работе.....	16
4.2. Проведение измерений .....	16
5. Обработка результатов эксперимента, требования к оформлению отчета .....	19
6. Контрольные вопросы.....	20
Список рекомендованной литературы и справочные данные .....	21
Приложение. Исторический экскурс .....	22

## Введение

Тепловой насос<sup>1</sup> — устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии к потребителю с более высокой температурой. Как утверждает второе начало термодинамики (в формулировке Клаузиуса), такой процесс переноса теплоты не может происходить самопроизвольно, однако, тепловой насос не нарушает его, поскольку на данный перенос затрачивается энергия, потребляемая извне.

Тепловой насос делает возможным использование для обогрева помещений «бесплатного» источника энергии — окружающую среду. Даже при том, что температура источника ниже температуры обогреваемого помещения, небольшие затраты электроэнергии позволяют «перекачать» ее в помещение, нагревая его. Широкое применение тепловых насосов находит в обогреве загородных домов. Это сравнительно дешевый, а главное экологически чистый способ решения проблемы отопления в сельской местности, куда зачастую не подведена достаточная электрическая мощность, и использование электрической энергии для прямой ее конвертации в тепло не представляется возможным. Эксплуатация таких установок избавляет собственников от необходимости делать большие запасы органического топлива (дрова, уголь) и сберегает окружающую среду.

Концепция тепловых насосов была разработана ещё в XIX веке выдающимся британским физиком и инженером Уильямом Томсоном, однако практически применять такие системы начали в 40-х годах XX столетия. За рубежом тепловые насосы применяются давно — и в быту, и в промышленности. Сегодня в Японии, например, эксплуатируется около 3 миллионов установок, в Швеции около 500 000 домов обогревается тепловыми насосами различных типов.

Самые эффективные, но и самые дорогие схемы предусматривают отбор тепла от грунта, чья температура на глубине нескольких метров практически

---

<sup>1</sup> Исторический экскурс на странице 21.

не меняется в течение года, что делает установку независимой от погоды. Отчасти, именно высокая стоимость стартовых вложений сдерживает широкое распространение данного вида отопления в нашей стране.

В данной работе Вам предлагается ознакомиться с теорией работы теплового насоса и определить параметры эффективности теплового насоса, имеющегося в нашей лаборатории.

# 1. Некоторые вопросы теории теплового насоса

## 1.1. Общие принципы работы теплового насоса

Тепловой насос, изучаемый в данной работе, устроен по принципу холодильной машины (рис. 1). Рабочее тело — холодильный агент (хладагент) циркулирует по контуру трубок, которые соединяют два змеевика: испаритель и конденсатор. Последние находятся в контакте с резервуарами энергии разной температуры  $T_1$  и  $T_2$ . Рассмотрим, что происходит с хладагентом при движении по контуру, как показано на рис. 1. Рабочее тело поступает в испаритель в жидком состоянии. Давление  $P_1$  в испарителе таково, что хладагент испаряется при постоянном давлении и температуре, поглощая при этом теплоту  $\Delta Q_1$  от резервуара с температурой  $T_1$ . Пары поступают в компрессор, где сжимаются, повышается их давление и температура. При сжатии в компрессоре к рабочему телу от внешнего источника (электродвигателя) подводится энергия  $\Delta W_{\text{полезн}}$ . Нагретые пары хладагента поступают в конденсатор, где превращаются в жидкость при постоянном давлении и температуре, отдавая тепло  $\Delta Q_2$  второму резервуару с температурой  $T_2$ . Далее, жидкий хладагент поступает в дроссель, где его давление падает до давления в испарителе, а температура снижается до температуры низкпотенциального источника. Затем, хладагент поступает в испаритель и таким образом цикл замыкается.

Обратим внимание, что перенос энергии от менее нагретого резервуара к более нагретому означает, что испарение хладагента должно происходить при температуре ниже, чем его конденсация. Этого достигают конденсируя хладагент при более высоком давлении  $P_2$  и испаряя его при более низком  $P_1$ . Функцию повышения давления в одной половине контура выполняет компрессор, а понижения давления в другой — расширительный клапан (дроссель). В контуре также имеется фильтр-осушитель, который служит для удаления влаги из хладагента и защищает капиллярную трубку дросселя от засорения твёрдыми частицами. Установка оснащена манометрами,

измеряющими давления в конденсаторе и испарителе.

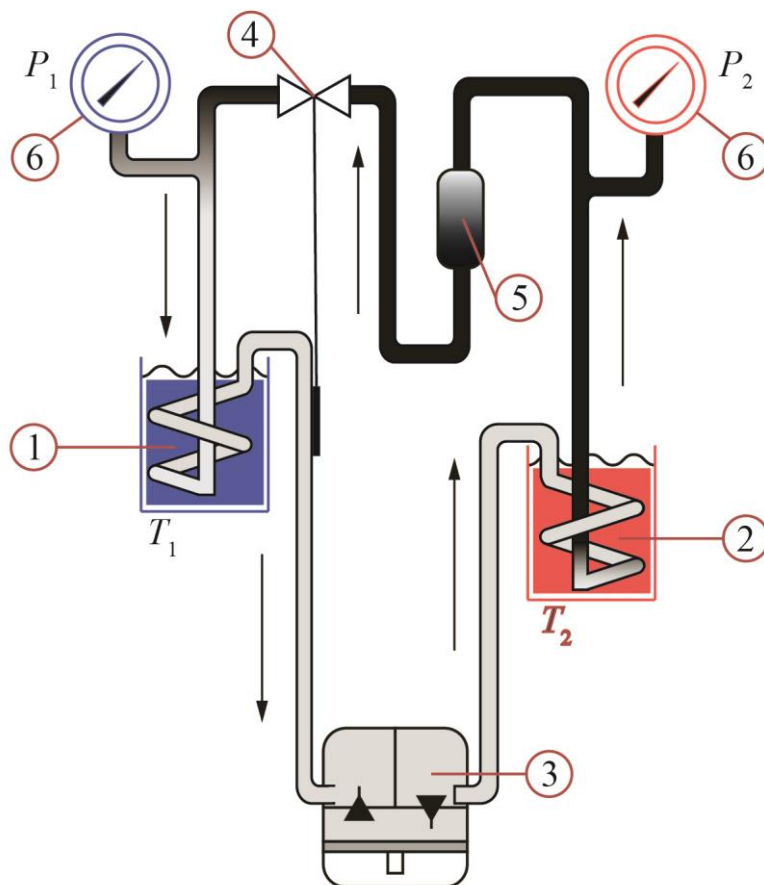


Рис. 1. Схема теплового насоса. 1 — испаритель, 2 — конденсатор, 3 — компрессор, 4 — расширительный клапан (дроссель), 5 — фильтр-осушитель, 6 — манометры.

В процессе работы между двумя резервуарами энергии устанавливается разность температур  $\Delta T = T_2 - T_1$ . Закон сохранения энергии, применяемый к циклу теплового насоса, учитывает всю теплоту, участвующую в процессе:

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_1 + \Delta W_{\text{потр}} - \Delta W_{\text{потерь}}, \quad (1)$$

где  $\Delta Q_2$  — теплота, переданная высокопотенциальному резервуару с температурой  $T_2$ ;  $\Delta Q_1$  — теплота, извлеченная из низкопотенциального резервуара с температурой  $T_1 < T_2$ ;  $\Delta W_{\text{потерь}}$  — энергия бесполезных тепловых потерь;  $\Delta W_{\text{потр}}$  — электрическая энергия, потребленная компрессором установки.

За эффективность (коэффициент трансформации) теплового насоса принимают величину  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q_2}{\Delta W_{\text{потр}}}, \quad (2)$$

являющуюся отношением теплоты, переданной высокопотенциальному резервуару, к энергозатратам, которые сопряжены с процессом переноса. Интересно отметить, что величина  $\varepsilon$  может превосходить 1, что, конечно же, не нарушает закон сохранения энергии, так как основная доля теплоты, отданная горячему резервуару, получается от холодного резервуара, а не от электросети, питающей компрессор. Теоретически максимальное значение  $\varepsilon$  достигается в обратном идеальном термодинамическом цикле Карно:

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_2 - T_1}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что, вообще говоря, эффективность теплового насоса зависит от разности температур  $\Delta T = T_2 - T_1$  двух его резервуаров. Реальные тепловые насосы обладают меньшей эффективностью ввиду отличия их цикла от обратного цикла Карно и имеющихся тепловых потерь.

## 1.2. Принцип работы и функции расширительного клапана

Расширительный клапан — это устройство, которое служит для понижения давления в системе и вместе с тем для автоматического управления расходом хладагента в соответствии с текущей тепловой нагрузкой. Это важно, поскольку в испаритель должно поступать хладагента не больше, чем может испариться при данных условиях. В противном случае неиспарившийся (жидкий) хладагент попадет в компрессор, что приведет к выводу его из строя. С другой стороны, слишком малое поступление хладагента приведет к уменьшению производительности установки.

Для понижения давления (разряжения), необходимого для эффективного испарения рабочего тела, чаще всего применяют дросселирование — медленное пропускание газа через тонкое сопло или пористую перегородку. С физической точки зрения дросселирование является близким к идеальному осуществлению процесса Джоуля-Томсона [2]. При этом происходит адиабатное расширение



от давления  $P_2$  до давления  $P_1$  без совершения работы. То есть дросселирование — существенно необратимый процесс, сопровождающийся увеличением энтропии и объёма при постоянной энтальпии.

Для предотвращения неполного испарения хладагента клапан настраивается на поддержание так называемого режима перегрева в испарителе. А именно: температура газообразного хладагента на выходе из испарителя  $T_{\text{вых}}$  устанавливается заведомо выше, чем его температура  $T_{\text{вх}}$  в жидком состоянии на входе в испаритель, то есть  $\Delta T_n = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}} > 0$ . Температура паров хладагента однозначно связана с давлением, под которым он находится, поэтому вместо сравнения температур в разных точках установки в реальности регуляторный механизм клапана оперирует разностью давлений.

Конструкция расширительного клапана показана на рис. 2. В процессе работы установки, при увеличении тепловой нагрузки на систему, температура хладагента на выходе испарителя  $T_{\text{вых}}$  увеличивается. Это ведет к повышению давления  $P_{\text{тэ}}$  над диафрагмой, так как этот объем связан с термочувствительным элементом, находящимся в соприкосновении с трубопроводом на выходе испарителя. Как только величина усилия, развиваемого давлением  $P_{\text{тэ}}$ , становится выше суммы усилий, развиваемых давлением  $P_1$  в испарителе и пружиной (т.е. выполняется условие:  $P_{\text{тэ}} > P_1 + P_{\text{пруж}}$ ), происходит отжимание вниз диафрагмы, приводящее к поднятию клапана над своим седлом и соответствующему увеличению расхода хладагента. При снижении тепловой нагрузки имеет место обратная картина. Таким образом, реализована система обратной связи, стремящаяся поддерживать постоянное значение разности температур  $\Delta T_n$ . Ввиду инерционности процессов нагрева и охлаждения частей установки система обратной связи работает неидеально, что может приводить к колебаниям параметра  $\Delta T_n$  вокруг положения равновесия, особенно сразу после включения установки. Через некоторое время устанавливается стационарный режим. Необходимое значение  $\Delta T_n$ , которое система будет стремиться поддерживать, регулируется усилием пружины. В

реальных холодильных установках  $\Delta T_n$  имеет величину порядка 6 К.

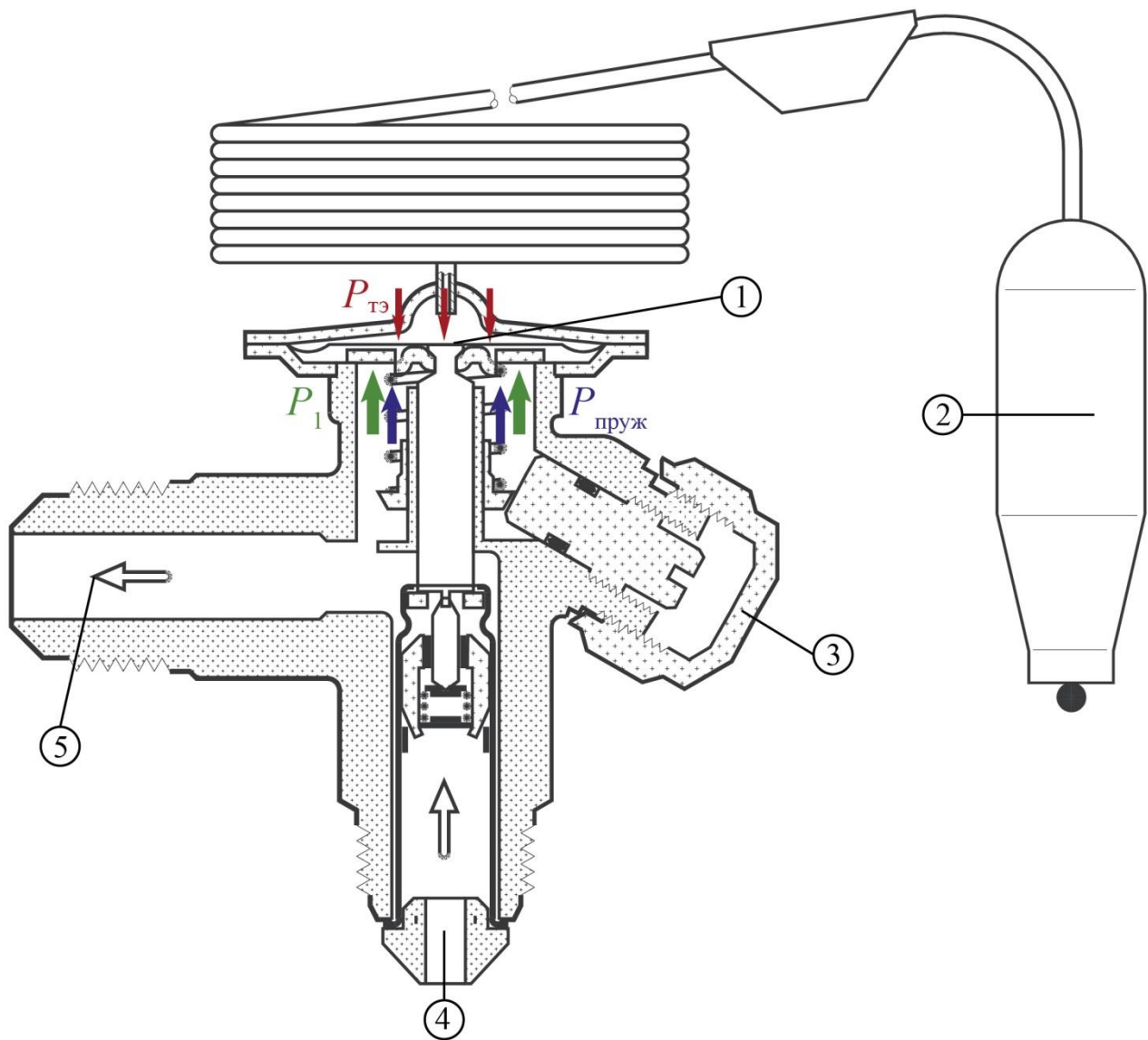


Рис. 2. Схема расширительного клапана в разрезе. 1 — диафрагма, 2 — термочувствительный элемент: баллончик с газом, приведенный в соприкосновение с трубопроводом установки на выходе испарителя, 3 — регулировочный винт, 4 — вход, 5 — выход.

## 2. Методика проведения эксперимента

### 2.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, имеющаяся в лаборатории, включает в себя тепловой насос, резервуары с жидкостью, измерительные приборы (рис. 3) и компьютер. Резервуары наполняются водой (масса  $m = 4$  кг, теплоемкость  $C = 4,19$  кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>). Компрессор включается в электрическую сеть через джоуль/ваттметр, с помощью которого измеряется потребляемая электрическая мощность. Для регистрации температуры используются специальные датчики — термодатчики, подключенные к цифровому термометру. Считывание показаний термометра может производиться в ручном режиме с дисплея, одновременно с этим данные могут регистрироваться компьютером.



Рис. 3. Схема экспериментальной установки. Указаны точки измерения температуры  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{\text{вых}}$ ,  $T_{\text{вх}}$ . 1 — холодный резервуар, 2 — горячий резервуар, 3 — компрессор, 4 — расширительный клапан, 5 — джоуль/ваттметр, 6 — цифровой термометр.

## 2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений

### Задание 1. Определение эффективности теплового насоса

В задании предлагается определить эффективность работы теплового насоса  $\varepsilon$  в зависимости от разности температур  $\Delta T$  двух резервуаров энергии: низкопотенциального — холодного, из которого насос отбирает энергию  $\Delta Q_1$ , и высокопотенциального — горячего, который принимает передаваемую энергию  $\Delta Q_2$ . Известно, что

$$\Delta Q_1 = \Delta T_1 C m, \quad (4)$$

$$\Delta Q_2 = \Delta T_2 C m, \quad (5)$$

где  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  — изменение температуры холодного и горячего резервуаров соответственно за время, пока происходила передача теплоты;  $m$  — масса резервуара;  $C$  — его теплоемкость. Отметим, что формула (4) верна до тех пор, пока в холодном резервуаре не начинается образование льда.

Эффективность  $\varepsilon$  определяется отношением энергии, переданной горячему резервуару, к энергозатратам, сопряженным с процессом ее «перекачки». Как следует из формул (2) и (5)

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_2}{P \Delta t} C m, \quad (6)$$

где  $P$  — мощность, потребляемая установкой,  $\Delta t$  — время, в течение которого происходил процесс передачи энергии. Во время работы насоса температуры резервуаров меняются, что приводит к изменению  $\varepsilon$ , зависящей от их разности  $\Delta T = T_2 - T_1$  (см. формулу (3)). Поэтому, вообще говоря, под эффективностью понимается мгновенная величина  $\varepsilon$ , рассчитанная за бесконечно малый интервал времени  $dt$ .

В процессе выполнения работы необходимо фиксировать данные о мощности, потребляемой компрессором установки, и значения температур  $T_1$  и  $T_2$ . Значения температур могут регистрироваться либо вручную, либо автоматически с помощью компьютера (по указанию преподавателя). В случае ручной регистрации данных измерения проводят

через равные конечные интервалы времени. Они должны быть не слишком малые, чтобы изменение температуры превосходило погрешность измерений, и не слишком большие, чтобы избежать сильного усреднения.

По полученным данным необходимо рассчитать зависимость  $\varepsilon(\Delta T)$ , а также построить ее график. При обработке результатов измерений обратите внимание, что:  $\Delta T_2$  — изменение температуры горячего резервуара, произошедшее *между двумя измерениями*, а  $\Delta T$  — разность температур двух резервуаров *в один и тот же момент времени*.

В установке существуют тепловые потери, связанные главным образом с нагревом компрессора, которые уменьшают эффективность насоса. В работе необходимо оценить суммарную энергию тепловых потерь  $W_{\text{потерь}}$  в установке за время ее работы. Из формулы (1) следует, что

$$W_{\text{потерь}} = W_{\text{потр}} + |Q_1| - |Q_2|, \quad (7)$$

где  $W_{\text{потр}} = Pt$  — энергия, потребленная компрессором из электросети за время  $t$  при мощности  $P$ . В процессе сжатия хладагента происходит увеличение его энтальпии (функции теплосодержания). Это совершается за счет полезной работы компрессора:

$$W_{\text{полезн}} = |Q_2| - |Q_1|. \quad (8)$$

Необходимо рассчитать энергию потерь в установке ( $W_{\text{потерь}}$ ) и полезную работу компрессора ( $W_{\text{полезн}}$ ) за время работы установки и сравнить полученные значения с общей потребленной энергией ( $W_{\text{потр}}$ ) за то же время. После этого можно рассчитать КПД компрессора и сделать вывод об эффективности работы компрессора, как отдельного механизма.

## Задание 2. Изучение функции расширительного клапана

В задании предлагается изучить функцию и принцип работы расширительного клапана теплового насоса. Также необходимо определить температуру перегрева хладагента в испарителе  $\Delta T_n$ , на поддержание которой настроен клапан. Напомним, что  $\Delta T_n = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$ , где  $T_{\text{вых}}$  — фактическая

температура газообразного хладагента на выходе из испарителя, а  $T_{\text{вх}}$  — температура жидкого хладагента перед входом в испаритель. Для достижения поставленной задачи необходимо проследить за изменением температуры  $T_{\text{вых}}$  и  $T_{\text{вх}}$  в процессе работы установки. По полученным данным необходимо вычислить изменение  $\Delta T_{\text{н}}$ , построить графики зависимости  $T_{\text{вых}}$ ,  $T_{\text{вх}}$  и  $\Delta T_{\text{н}}$  от времени. Из графика определить температуру перегрева  $\Delta T_{\text{н}}$  в стационарном режиме работы теплового насоса, а также оценить время выхода установки на стационарный режим работы после включения.

### 3. Техника безопасности по работе с приборами

Манипуляции с установкой и с приборами следует выполнять осторожно и бережно. Датчики температуры (термопары) имеют длинный тонкий щуп, который легко деформировать (погнуть). При перемешивании воды в резервуарах не повредите их.

При длительной работе установки может произойти срабатывание системы защиты и автоматическое отключение компрессора во избежание его перегрева. Для запуска компрессора необходимо сменить воду в резервуарах, наполнив их водой комнатной температуры.

#### **ВНИМАНИЕ:**

1. Все манипуляции с электрическими контактами установки производить только сухими руками.
2. Трубки установки (циркуляционный контур) находятся под давлением. Не допускайте их повреждения, не пытайтесь регулировать или разбирать систему.
3. Не осушайте змеевики во время работы компрессора. Прикосновение к ним может привести к ожогу.
4. Не следует теплоизолировать компрессор, накрывать его чем-либо. Это может привести к его перегреву.

## **4. Порядок выполнения лабораторной работы**

### **4.1. Подготовка экспериментальной установки к работе**

1. Наполнить нагреваемый (красный) и охлаждаемый (синий) резервуары 4 литрами воды и осторожно поставить их в установку таким образом, чтобы медные змеевики испарителя и конденсатора были полностью погружены в жидкость.
2. Убедиться, что шнур электропитания компрессора подключен к джоуль/ваттметру, два датчика температуры, используемые в текущем задании для измерения температуры жидкости холодного  $T_1$  и горячего  $T_2$  резервуаров, подключены к цифровому термометру (рис. 3), джоуль/ваттметр и цифровой термометр подключены к сети электропитания (~220 В).
3. Включить джоуль/ваттметр и цифровой термометр. Для этого нажать тумблеры питания на задней панели приборов. При этом должны включиться их дисплеи.
4. Настроить вывод показаний цифрового термометра. Удобным для работы является режим поочередного показа температур обоих датчиков. Для входа в режим нажать кнопку AUTO на передней панели.
5. Включить компрессор установки примерно на 10 минут для прогрева и выхода на рабочий режим. Для этого нажать кнопку OUTPUT на передней панели джоуль/ваттметра.
6. Убедиться, что установка функционирует: вода в красном ведре должна нагреваться, а в синем — охлаждаться.
7. После прогрева выключить компрессор и сменить воду в резервуарах.

### **4.2. Проведение измерений**

#### Задание 1. Определение эффективности теплового насоса

1. Подготовить установку к работе, как описано в п. 4.1. Убедиться, что резервуары наполнены водой приблизительно комнатной температуры.
2. а) В случае ручной регистрации данных подготовить таблицу (табл. 1)




для записи результатов измерений. Необходимо будет фиксировать время  $t$ , прошедшее после начала измерений, температуры  $T_1$  и  $T_2$ . В таблице также удобно вести расчет величин  $\Delta T$ ,  $\Delta T_2$  и  $\varepsilon$ . Включить компрессор и приступить к измерениям. Фиксировать показания температурных датчиков каждые 60 секунд, занося их в таблицу. Оценить погрешность измерения температуры и интервалов времени.

Таблица 1.

Изменение температуры и расчет эффективности теплового насоса

$t, \text{с}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$


б) В случае автоматической регистрации данных (по указанию преподавателя) запустить программу CASSY Lab. Для включения компрессора нажать на изображение джоуль/ваттметра на экране. Для запуска измерений нажать кнопку  , либо клавишу F9. В процессе эксперимента программа должна записывать данные температур  $T_1$  и  $T_2$ .

3. Снять показания мощности, потребляемой компрессором и оценить ее погрешность.
4. В процессе работы установки **постоянно перемешивать воду** в резервуарах для равномерного теплообмена и корректного измерения температуры.
5. Измерение необходимо завершить до начала образования льда на змеевике в холодном резервуаре. В противном случае формула (4) неприменима.

## Задание 2. Изучение функции расширительного клапана

1. Подготовить установку к работе, как описано в п. 4.1. Убедиться, что резервуары наполнены водой приблизительно комнатной температуры.
2. Убедиться, что установлены температурные датчики для измерения температуры газообразного хладагента на выходе из испарителя  $T_{\text{вых}}$  и температуры жидкого хладагента на входе в испаритель (сразу после выхода из дросселя)  $T_{\text{вх}}$  (рис. 3). Для улучшения теплового контакта термопары с медным держателем при необходимости нанести каплю

силиконового масла в место их соприкосновения.

3. В данном задании предлагается использовать автоматическую регистрацию данных температуры при помощи компьютера. Для этого необходимо запустить программу CASSY Lab. Система автоматически распознает подключенные к компьютеру устройства. Для включения компрессора нажать на изображение джоуль/ваттметра на экране. Для запуска измерений нажать кнопку , либо клавишу F9.
4. В процессе работы установки **постоянно перемешивать воду** в резервуарах для равномерного теплообмена и корректного измерения температуры.
5. Измерение можно завершить, когда разность температур перестанет значительно изменяться, обычно это происходит по истечении примерно  $5 \div 10$  минут после включения установки.

## 5. Обработка результатов эксперимента, требования к оформлению отчета

Отчет о лабораторной работе должен включать:

1. Описание цели работы и постановку задачи.
2. Схему экспериментальной установки.
3. Используемые в расчетах формулы с расшифровкой обозначений.
4. Результаты измерений и их обработку, включая расчет погрешностей.
5. Обсуждение результатов и выводы.

К заданию 1:

- Графики зависимостей  $T_1(t)$ ,  $T_2(t)$ ,  $\Delta T(t)$ ,  $\varepsilon(\Delta T)$  и выводы об их характере.
- Значения  $W_{\text{потерь}}$ ,  $W_{\text{полезн}}$ ,  $W_{\text{потр}}$  и вывод об их соотношении.

К заданию 2:

- Графики зависимостей  $T_{\text{вых}}(t)$ ,  $T_{\text{вх}}(t)$ ,  $T_n(t)$ , анализ их поведения.
- Установившееся значение  $T_n(t)$  и время, потребовавшееся для выхода в стационарный режим.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Принцип работы теплового насоса.
2. Что такое эффективность теплового насоса и как она зависит от разности температур конденсатора и испарителя?
3. Как этот результат необходимо учесть при проектировании реальных тепловых насосов, эксплуатируемых для обогрева жилых помещений в зимних условиях?
4. Уравнение баланса энергии для теплового насоса.
5. Какова доля потерь энергии в Вашей установке?
6. Функции расширительного клапана при работе теплового насоса.
7. Принцип работы расширительного клапана.
8. Почему, проходя через расширительный клапан, рабочее тело охлаждается?
9. Что такое температура перегрева и какова она для Вашей установки?
10. В чем преимущество теплового насоса по сравнению с другими источниками тепловой энергии (дрова, уголь, газ, электричество)?

## **Список рекомендованной литературы и справочные данные**

1. *Shoichi Toyabe, Takahiro Sagawa, Masahito Ueda, Eiro Muneyuki, Masaki Sano*  
Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality // *Nature Physics* 6, 988–992, 2010.
2. Сивухин Д.В. *Общий курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика*. Москва: Наука. 1990. 544 с.

## Приложение. Исторический экскурс

С прообразом идеи теплового насоса связан известный мысленный эксперимент, предложенный британским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом в 1867 году. В эксперименте рассматривается сосуд с газом, разделенный перегородкой на две части: левую и правую. Исходно температуры в обеих частях сосуда равны. Перегородка оборудована маленькой дверцей. Когда к дверце с левой стороны подлетает молекула, скорость которой выше средней скорости молекул в данной части сосуда, дверца открывается и пропускает быструю молекулу из левой части сосуда в правую. Для молекул, находящихся в правой части, дверца открывается, если их скорость меньше средней скорости молекул. Сама по себе дверца открываться не может. Поэтому работу по определению скоростей движения молекул, открыванию и закрыванию дверцы, должно выполнять некое устройство, названное «демоном Максвелла». С помощью «демона Максвелла» можно увеличить температуру в одной части сосуда за счет охлаждения другой, казалось бы, без дополнительного подвода энергии к системе. Парадокс разрешается, если рассмотреть замкнутую систему, включающую в себя сосуд и демона Максвелла, для функционирования которого необходима передача энергии от стороннего источника. За счёт этой энергии и происходит разделение горячих и холодных молекул в сосуде, передача тепла от холодного тела к более горячему, то есть переход в состояние с меньшей энтропией.

Интересно заметить, что подобное микроустройство, однонаправленно пропускающее высокоэнергетичные молекулы, было продемонстрировано японскими учеными в 2010 году [1]. Оно представляет собой 2 связанных шарика по 300 нм каждый. Один находился на поверхности стекла, второй мог вращаться вокруг первого. Установку при этом заполняла жидкость. Её молекулы хаотично подталкивали шарики с равной вероятностью как по часовой, так и против часовой стрелки. Далее авторы добавили слабое электрическое поле, которое создавало крутящий момент. Поставив высокоскоростную камеру, ученые заставили компьютер анализировать и управлять движением «храповика». Каждый раз, когда ротор в броуновском движении делал шаг против поля, компьютер сдвигал последнее так, что шарик мог повернуться, но когда ротор пытался вращаться обратно, поле блокировало его. Так был создан аналог открываемой и закрываемой демоном Максвелла дверцы: ротор увеличивал свою энергию за счёт теплового движения молекул. Законов природы, впрочем, установка не нарушает, поскольку для работы «демона» (камеры, системы коррекции напряжения) необходима энергия.