

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Н. С. Буфетов, И. В. Литвинов, А. О. Замчий, Р. В. Оськин.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.8**  
**КОМПРЕССОРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС**

Молекулярный практикум

Новосибирск  
2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА.....	3
2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	8
3. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	10
3.1 Подготовка к работе.....	10
3.2 Подготовка к работе с планшетом регистратором..	11
3.3 Задание 1. Проведение эксперимента.....	11
3.4 Задание 2. Расчеты.....	12
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	14
ПРИЛОЖЕНИЕ. Диаграмма Моляе (p-h диаграмма).....	15

## ВВЕДЕНИЕ

Тепловые насосы (теплонасосные установки) позволяют нагревать какой-либо объект или определенную среду путем отбора теплоты из окружающей среды или от низкотемпературных бытовых и промышленных отходов. Они не производят тепловую энергию, а за счет использования внешней работы переносят теплоту от теплоносителя, имеющего температуру  $0 \dots 40^\circ\text{C}$  (называемого низкопотенциальным) к теплоносителю, принимаемому, например, для отопления и горячего водоснабжения (называемого высокопотенциальным), нагревая его до  $50 \dots 80^\circ\text{C}$ .

Преимущество применения теплонасосных установок (ТНУ) в системах теплоснабжения по сравнению с другими способами тепло-снабжения состоит в значительной экономии затрат энергии. Тепловые насосы можно отнести к отдельному виду теплоэнергетического оборудования, для них нельзя использовать понятие коэффициента полезного действия, так как ТНУ позволяют вырабатывать тепловой энергии больше, чем в них затрачивается электроэнергия. Отношение выработанной теплоты к затраченной энергии на осуществление цикла теплонасосной установки называется коэффициентом преобразования теплоты, значение которого в тепловом насосе составляет от 2,5 до 8.

В выполняемой работе рассмотрен принцип действия теплового насоса, который основан на отдаче и поглощении теплоты рабочим телом (агентом) в цикле при периодическом переходе его из одного состояния в другое. В данном конкретном случае роль рабочего тела исполняет «хладагент» фреон R-22.

Целью данной работы является ознакомление с устройством и принципами работы тепловых насосов, измерением их параметров и характеристик, и представление результатов этих измерений на примере компрессионного теплового насоса.

### 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

В основе действия любой тепловой машины (теплового двигателя, теплового насоса, холодильной машины) лежит второе начало термодинамики, которое применительно к тепловым насосам гласит: «для передачи теплоты от менее нагретого (холодного) тела к более нагретому необходимо затратить энергию».

Тепловые насосы по виду рабочего агента разделяются на три типа: парокompрессионные, абсорбционные и термоэлектрические.

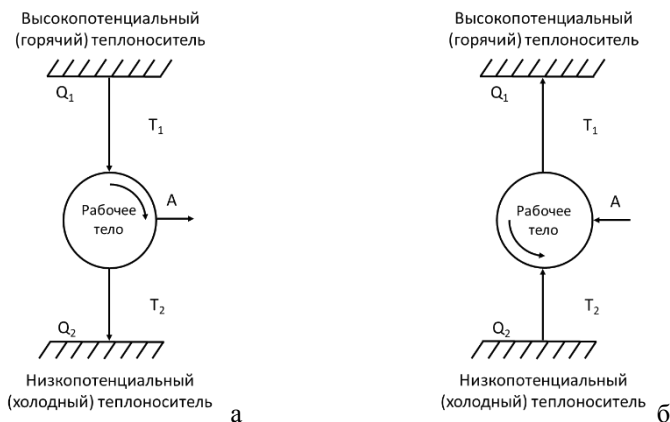
В парокompрессионных тепловых насосах [1,2,3,4,5] рабочий агент переносит тепловую энергию в результате фазовых переходов из газообраз-

ного состояния в жидкое в результате компрессорного сжатия (отдача теплоты пространству, окружающее конденсатор) и обратного перехода в газообразное, где он откачивает теплоту из окружающей испаритель среды.

В абсорбционных насосах [1] роль компрессора выполняет абсорбент (жидкий поглотитель рабочего агента), который нагревается в результате перехода рабочего вещества (абсорбции) из газообразного в жидкий раствор с абсорбентом и охлаждается при десорбции при более низком давлении.

Термоэлектрические тепловые насосы [6,7] – устройства, использующие для перемещения тепловой энергии эффект Пельтье (Эффект Пельтье – термоэлектрическое явление, при котором происходит выделение или поглощение теплоты при прохождении электрического тока в месте контакта (спая) двух разнородных проводников. Величина выделяемой теплоты и её знак зависят от вида контактирующих веществ, направления и силы протекающего электрического тока.)

На Рис. 1 показаны принципиальные схемы действия теплового двигателя, в котором происходит превращение теплоты в механическую энергию (а) и теплового насоса (б). Требование непрерывности функционирования таких устройств приводит к необходимости совершения рабочим телом повторяющегося кругового процесса (термодинамического цикла), в котором оно претерпевает последовательное изменения состояния с возвращением в исходное состояние. Для непрерывного получения полезной работы необходимо располагать двумя объектами, обладающими разными температурами ( $T_1 > T_2$ ) и являющимися как источниками, так и приемниками теплоты. В прямом цикле тепловая машина получает теплоту от горячего теплоносителя ( $Q_1$ ) и отдает её часть холодному



*Рис. 1:* Термодинамическая схема тепловой машины: а – теплового двигателя и б – теплового насоса.

теплоносителю ( $Q_2$ ), совершая при этом работу  $A$ . Тепловой насос можно рассматривать как обращенную тепловую машину, в которой происходит обратный цикл, при потреблении работы  $A$ .

В том случае, когда оба теплоносителя имеют постоянные температуры, наиболее оптимальной комбинацией процессов, составляющих цикл, целью которого является получение максимальной работы, являются два изотермических и два адиабатических процесса. Такой цикл называется циклом Карно. Для анализа работы теплового насоса используются (T-S)- и (P-H)-диаграммы, где  $T$  - температура,  $S$  - энтропия,  $P$  - давление,  $H$  - энтальпия. Согласно определению Рудольфа Клаузиуса, энтропия ( $S$ ) – это функция состояния рабочего тела, полный дифференциал которой для равновесных процессов равен «приведенной теплоте» [1]:

$$dS = \delta Q/T$$

Таким образом, из второго начала термодинамики следует, что существует однозначная функция состояния  $S$ , которая при квазистатических адиабатных (изоэнтропийных -  $\delta Q = 0$ ) процессах остаётся постоянной.

Энтальпия ( $H$ ) – это инженерная функция состояния, определяемая как сумма внутренней энергии  $U$  и произведения давления  $P$  на объем  $V$ ,

$$H = U + PV.$$

Вместо экстенсивных величин  $S$  и  $H$  часто используют их отношения к массе тела, называемые удельными энтропией и энтальпией, обозначаемые  $s$  и  $h$ , соответственно [1].

В выполняемой работе изучается действие теплового насоса, который основан на отдаче и поглощении теплоты рабочего агента в цикле при периодическом переходе его из одного состояния в другое.

Принцип работы парокомпрессионного насоса основывается на циклическом процессе с фазовым переходом, которое претерпевает рабочее тело в насосе. Электроприводной компрессорный тепловой насос состоит из компрессора с электроприводом, конденсационного аппарата, расширительного клапана и испарителя.

В идеале этот процесс можно разделить на четыре этапа, а именно сжатие, сжижение, сброс давления и испарение (см. Рис. 2 и 3).

График давления  $p$  от удельной энтальпии  $h$  рабочего тела (Рис. 2), называемый диаграммой Молье, часто используется для представления цикла работы компрессорного теплового насоса. На этой диаграмме а) красные линии - изотермы, б) зелёные - изоэнтропы, в) черные - линии сухости пара: левая - граница жидкой фазы насыщения, правая – граница насыщенного пара.

Рабочее тело полностью конденсируется слева от линии границы раздела фаз испарения и присутствует в виде перегретого пара справа от границы раздела фаз конденсации и в виде смеси жидкости и газа между этими двумя границами. Эти две границы сходятся в критической точке.

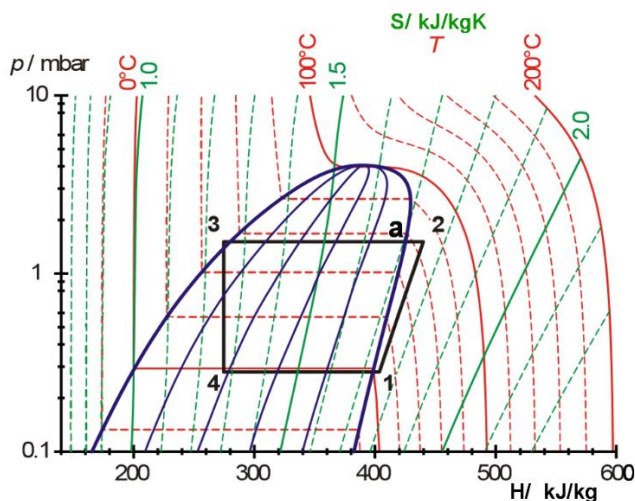


Рис.2: Идеальный циклический процесс теплового насоса на диаграмме Молье.

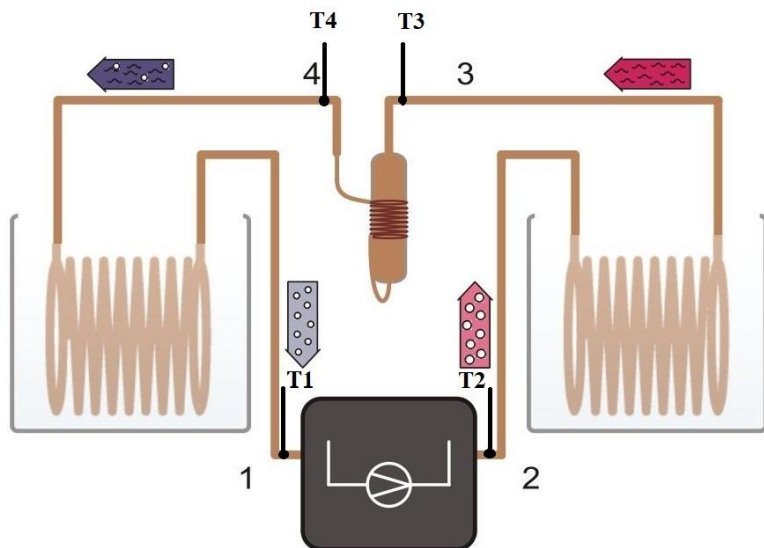


Рис. 3: Схематическое представление теплового насоса с компрессором (1→2), конденсационным аппаратом (2→3), расширительным клапаном (3→4) и испарителем (4→1). Т1 – термopа на входе в компрессор, Т2 – термopа на выходе из компрессора, Т3 – термopа на входе в расширительный клапан, Т4 – термopа после расширительного клапана.

Рассмотрим термодинамический цикл, совершаемый рабочим телом в процессе работы теплового насоса. Процесс 1-2 – обратимый изoэнтропийный процесс сжатия газообразного рабочего тела (сухого пара). На этапе сжатия цикла газообразное рабочее тело всасывается компрессором и сжимается без какого-либо изменения энтропии ( $S_1=S_2$ ) от  $P_1$  до  $P_2$ , причем в ходе этого процесса рабочее тело нагревается, и его температура, соответственно, возрастает с  $T_1$  до  $T_2$ . Механическая работа по сжатию, совершаемая с единицей массы, равна  $\Delta W=h_2-h_1$ . На практике компрессор должен сжимать только сухой пар, поэтому рабочее тело до входа в компрессор должно быть слегка перегрето, что соответствует смещению точки 1 с линии насыщения вправо.

Процесс 2-3 – изотермическая конденсация хладагента в конденсаторе и отдача теплоты высокопотенциальному теплоносителю. При этом, как видно из графика, прежде чем пар начнет конденсироваться, его следует охладить при постоянном давлении (до точки **а**). Охлаждение агента происходит до температуры несколько ниже температуры конденсации. Причиной этого является более низкая температура в окружающем теплообменнике резервуаре. Высвобождаемая в результате процесса конденсации теплота (избыток теплоты и скрытая теплота конденсации) на единицу массы составляет  $\Delta q_{\text{конд}}=h_2-h_3$ . Это повышает температуру в окружающем теплообменнике резервуаре. В реальных условиях потери давления в трубопроводах между конденсатором и расширительным клапаном приводят к частичному испарению рабочего тела. Таким образом, жидкость после конденсатора переохлаждают, при этом точка 3 смещается с линии насыщения влево, что снижает долю пара.

Процесс 3-4 – адиабатический процесс расширения рабочего тела в расширительном клапане. Сконденсировавшееся рабочее тело достигает выпускного клапана, где происходит сброс его давления (без совершения какой-либо механической работы). В ходе этого процесса температура также уменьшается благодаря работе, которую необходимо совершить, чтобы преодолеть молекулярные силы притяжения внутри рабочего тела (эффект Джоуля-Томсона). Процесс Джоуля-Томпсона протекает в теплоизолированных условиях и представляет собой процесс необратимого расширения, являясь при этом изoэнтальпическим ( $h_4=h_3$ ).

Процесс 4-1 – изотермическое испарение рабочего тела в испарителе за счет теплоты, отобранной у холодного теплоносителя. По мере того, как рабочее тело поглощает тепло внутри испарителя, оно полностью испаряется.

Это охлаждает окружающий его резервуар. Теплота, поглощаемая единицей массы, составляет  $\Delta q_{исп} = h_1 - h_4$ .

Чтобы изобразить систему на диаграмме Молье, вышеописанный идеальный цикл можно определить путем измерения давлений  $p_4 = p_1$  и  $p_3 = p_2$ , соответственно, перед и после расширительного клапана, а также температур  $T_1$  и  $T_3$ , соответственно, перед компрессором и расширительным клапаном (Рис. 3).

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Элементы установки в этом опыте соединяются с помощью медных трубок, образуя замкнутую систему, и монтируются на основании (Рис. 4). Благодаря наглядности установки, их легко связать с последовательностью фазовых превращений, происходящих в цикле работы теплового насоса.

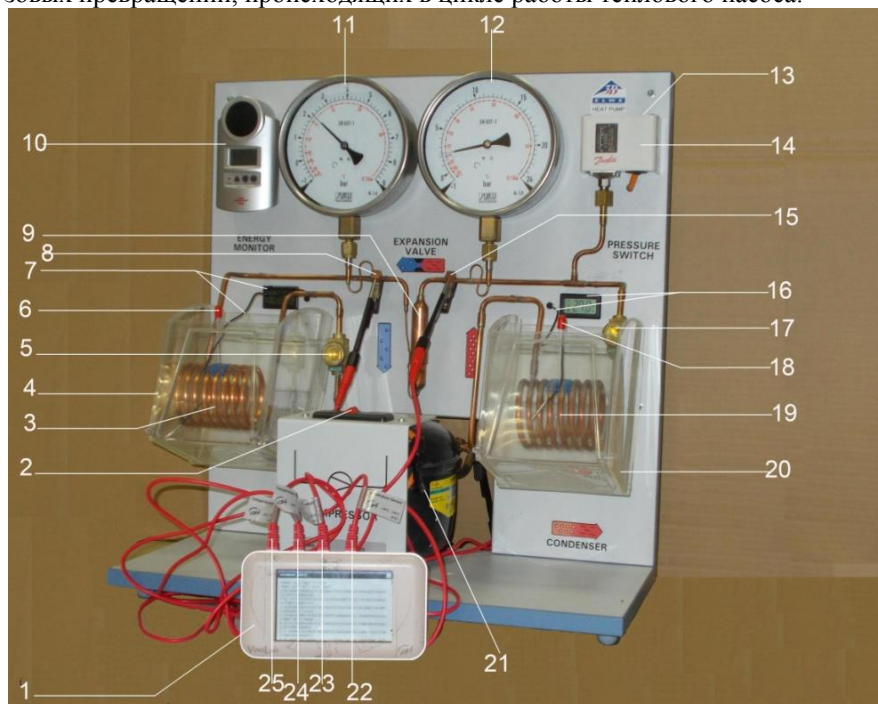


Рис.4: Общий вид экспериментальной установки

- 1 – Планшет-регистратор «VinciLab»,
- 2 – выключатель компрессора.
- 3 – Испаритель,
- 4 – Водохранилище вокруг испарителя



- 5 - Смотровое окно в испарителе
- 6 – Мешалка для испарителя
- 7 – Цифровой термометр с датчиком температуры воды в ванне испарителя,
- 8 – Термопара Т4 после расширительного клапана на входе в испаритель
- 9 – Расширительный клапан
- 10 – Энергетический монитор
- 11 – Манометр для стороны низкого давления
- 12 – Манометр для стороны высокого давления
- 13 – Переключатель сброса
- 14 – Выключатель избыточного давления
- 15 – Термопара Т3 на входе в расширительный клапан после конденсатора
- 16 – Цифровой термометр с датчиком температуры воды в ванне конденсатора
- 17 – Смотровое окно в конденсаторе
- 18 – мешалка для конденсатора,
- 19 – конденсатор
- 20 – водяная ванна конденсатора
- 21 – компрессор
- 22 – термопарный датчик температуры Т4
- 23 – термопарный датчик температуры Т3
- 24 – термопарный датчик температуры Т2
- 25 – термопарный датчик температуры Т1
- Т<sub>1</sub>, Т<sub>2</sub>, Т<sub>3</sub>, Т<sub>4</sub> – вход сигналов термопарных датчиков в планшет-регистратор

Испаритель и конденсационный аппарат выполнены в виде змеевиков из медных трубок; при этом каждый из них погружен в отдельную водяную ванну, которая служит резервуаром для определения, поглощенной или от-данной теплоты. Два больших манометра показывают давление хладагента в обоих теплообменниках. Два аналоговых термометра позволяют измерять температуру в этих двух водяных ваннах. Датчики температуры со специально сконструированными измерительными клеммами используются для регистрации температур в медных трубках перед и после компрессора и рас-ширительного клапана.

Основным показателем работы теплового насоса принято считать **коэффициент преобразования  $\varepsilon$** , который является отношением удельной теп-лоты  $q_{\text{конд}}$  (кДж/кг), (теплота, приходящаяся на единицу массы хлада-гента), передаваемой горячему источнику, (в нашем случае – воде в ванне конденсатора) к удельной работе  $W_{\text{цикл}}$  (кДж/кг), подводимой от внешнего источника (энергия, приходящаяся на единицу массы хладагента),.

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{конд}}}{W_{\text{цикла}}} \quad (1)$$

А так как по диаграмме Мольте:

$$q_{\text{конд}} = h_2 - h_3 \quad \text{и} \quad W_{\text{цикл}} = h_2 - h_1 \quad \text{то}$$


$$\varepsilon = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

Определение энтальпий  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  идеального циклического процесса и количества теплоты  $\Delta q_{\text{конд}}$ , поступающей в резервуар горячей воды за интервал времени  $\Delta t$  дает возможность оценить массовый поток рабочего тела.

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta q_{\text{конд}}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{h_2 - h_3} \quad (3)$$

### 3. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### 3.1 Подготовка к работе

1. Изучите схему экспериментальной установки и найдите все обозначенные на ней элементы на реальной экспериментальной установке.
2. Разместите четыре датчика температуры ВТ01 на медных трубках (рис.3) перед входом в компрессор (точка 1), на выходе из компрессора (точка 2), перед расширительным клапаном (точка 3), и после него (точка 4).
3. Подсоедините четыре датчика температуры ВТ01 к аналоговым входам А1-А4 планшета-регистратора «VinciLab». Включите планшет и, в случае необходимости, подключите его к зарядке. Запустите приложение «Coach» и пиктограмму .
4. Аккуратно налейте 2000 мл воды в каждую кювету и разместите измерительные зонды цифровых термометров на дне кювет. Для этого заполните ванны водой и переместите их под испаритель и конденсатор стороной с низким краем. Далее поверните ванны на 180 градусов и закрепите их на металлических держателях (Рис. 5).

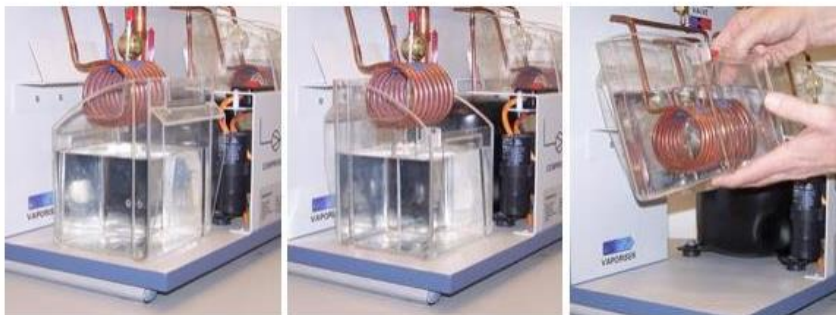


Рис. 5: Иллюстрация к замене воды.

5. Включите компрессор для выхода установки на рабочие характеристики (примерно 10 мин). Убедитесь, что измеритель электрической



мощности выдает показания в Ваттах (последовательно переключая измерительный параметр с помощью кнопки «FUNC»).



6. Выключите компрессор, вылейте воду из двух кювет и налейте снова по 2000 мл и разместите температурные зонды.


### 3.2 Подготовка к работе с планшетом регистратором

Планшет-регистратор VinciLab позволяет регистрировать, визуализировать, а также сохранять и переносить экспериментальные данные на флеш-карту. Внутри регистратора находится аналогово-цифровой преобразователь, позволяющий опрашивать до 6 аналоговых каналов.

В данном случае вам предлагается регистрировать значения температуры с помощью датчиков ВТ-01 в точках 1–4 (рис. 3) в течение 25 минут с периодичностью в 1 минуту. При этом информация будет записываться в таблицу.

Чтобы создать таблицу необходимо нажать на вкладку пиктограмму , и во вкладке  выберите «New table». Создайте таблицу из пяти столбцов, где 1<sup>ый</sup> столбец – это время, 2-4<sup>ый</sup> столбцы показания температурных датчиков А1-А4. Пока таблица будет пустой

С помощью настройки регистрации , вы можете выбрать время опроса каналов и частоту дискретизации. При нажатии на значок  начнется регистрация сигналов, и таблица начнет заполняться.

По окончании сбора данных полученную таблицу можно экспортировать, нажав «Export table» во вкладке . Полученный файл можно скопировать себе на флеш-карту. Для этого нужно выйти из приложения «Coach» в главное меню, сохранив свой эксперимент в формате «.cmr». Войти в приложение «My files» и скопировать файл таблицы (.txt) из директории «/My files/Coach» в директорию «USB».

Можете запустить тестовую регистрацию с разумным временем опроса аналоговых каналов и частотой дискретизации. Произвести экспорт таблицы и копирование на флэш-карту.

### 3.3. Задание 1. Проведение эксперимента


**Цель задания:** провести экспериментальные измерения температуры «холодильника» и «нагревателя», температуры и давления рабочего тела в течение работы по термодинамическому циклу.

1. Установите время регистрации 25 минут с периодичностью 1 минута. Будьте готовы вручную записывать:  
а - значения показаний давления  $P1$  и  $P2$  на манометрах до и после расширительного клапана,

**б** - температуры  $T_{\text{конд}}$  и  $T_{\text{испар}}$  в обеих кюветах ( $T_{\text{конд}}$  – температура в кювете конденсации хладагента – (высокая),  $T_{\text{испар}}$  – температура в кювете испарения хладагента – (низкая),

**в** - значения потребляемой электрической мощности компрессором  $W_{\text{цикла}}$  всего - 5 параметров.

Таким образом, получится таблица из 4-х значений температуры, зарегистрированной с помощью планшета-регистратора, а также таблица из 5 параметров, записанных вручную, в течение времени эксперимента (25 минут).

- Включите компрессор и одновременно запустите регистрацию температур с помощью значка . Записывайте показания раз в 1 минуту.

**Внимание!** Непрерывно перемешивайте воду в обеих кюветах, чтобы обеспечить равномерность температурного поля внутри кюветы.

- По истечении 25 минут и завершению регистрации таблицы, выключите компрессор.
- Осушите кюветы с водой.

### 3.4 Задание 2. Расчеты

- В программе Excel сформируйте таблицу из 10-ти столбцов: времени  $t$  (мин),  $T_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_3$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_4$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\text{конд}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\text{испар}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $P_{\text{испар}}$  (bar),  $P_{\text{конд}}$  (bar),  $W_{\text{компр}}$  (Вт).

- Постройте графики зависимостей  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_{\text{конд}}$ ,  $T_{\text{испар}}$  от времени ( $t$ ). Объясните характер полученных кривых.

- Определите количество энергии, потребленной компрессором за время  $\Delta t$  (время от начала эксперимента до выбранного момента  $\approx 15$  мин):

$$Q_{\text{компр}} = W_{\text{компр}} \cdot \Delta t$$

- Определите количество теплоты, переданной воде, охлаждающей конденсатор за время  $\Delta t$ :

$$Q_{\text{конд}} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{конд финиш}} - T_{\text{конд старт}})$$

и мощность этого теплового потока

$$W_{\text{конд}} = Q_{\text{конд}} / \Delta t$$

- Определите количество теплоты, изъятая из воды ванны испарителя за время  $\Delta t$ :

$$Q_{\text{испар}} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{испар старт}} - T_{\text{испар финиш}})$$

и мощность этого теплового потока

$$W_{\text{испар}} = Q_{\text{испар}} / \Delta t$$

- Сделайте расчёт реального **коэффициента преобразования**  $\varepsilon_{\text{реал}}$  компрессора по формуле

$$\varepsilon_{\text{реал}} = W_{\text{конд}} / W_{\text{компр}}$$

7. Составьте график циклического процесса теплового насоса, используя значения  $T_1, T_2, T_3, T_4, P_{испар}, P_{конд}$  при фиксированном времени ( $t=15$  мин) на диаграмме Молье (см. приложение). Считайте с диаграммы соответствующие значения удельной энтальпии  $h_1, h_2, h_3$  и  $h_4$ .

8. Оцените массовый поток рабочей телоты по формуле (3)

9. Произведите расчёт **коэффициента преобразования  $\varepsilon_{теор}$**  по считанным с диаграммы Молье (см. Приложение) значениям энтальпии:

$$\varepsilon_{теор} = \frac{q_{конд}}{W_{цикла}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}.$$

10. Рассчитайте массовый расход хладагента по формуле (3), зная значения энтальпии  $h_2$  и  $h_3$  из идеального термодинамического цикла.

*Указание:* Значение  $T_1$  и  $P_4=P_1=const$  определяют точку 1 на диаграмме Молье. Точка пересечения соответствующей изоэнтропы с горизонтальной линией постоянного значения  $P_3=P_2=const$  определяет точку 2. Пересечение горизонтальной линии с изотермами  $T_3$  определяет точку 3, а перпендикулярная линия с горизонтальной линией постоянного значения  $P_4=const$  определяет точку 4.

Таким образом, в результате выполнения работы проведено ознакомление с устройством и принципами функционирования тепловых насосов. Реализован термодинамический цикл, совершаемый в процессе работы компрессионного теплового насоса. Проведены измерения основных параметров цикла, определены характеристики представленного теплового насоса.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М: «Энергия», 1968. — 496 с., ил.
2. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика, Учебное пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск, Изд-во Новосибирского Университета, 2000. — 608 с.
3. Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы, Учебное пособие, Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. — 142 с.
4. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов, Одесса: Студия «Негоциант», 2006. — 712 с.
5. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. - М.: Энергоиздат, 1982. — 224 с., ил.
6. Цветков Ю. Н., Аксенов С. С., Шульман В. М. Судовые термоэлектрические охлаждающие устройства.— Л.: Судостроение, 1972.— 191 с.
7. Мартыновский В. С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов.— М.: Энергия, 1979.— 285 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ. Диаграмма Мольте (p-h диаграмма)

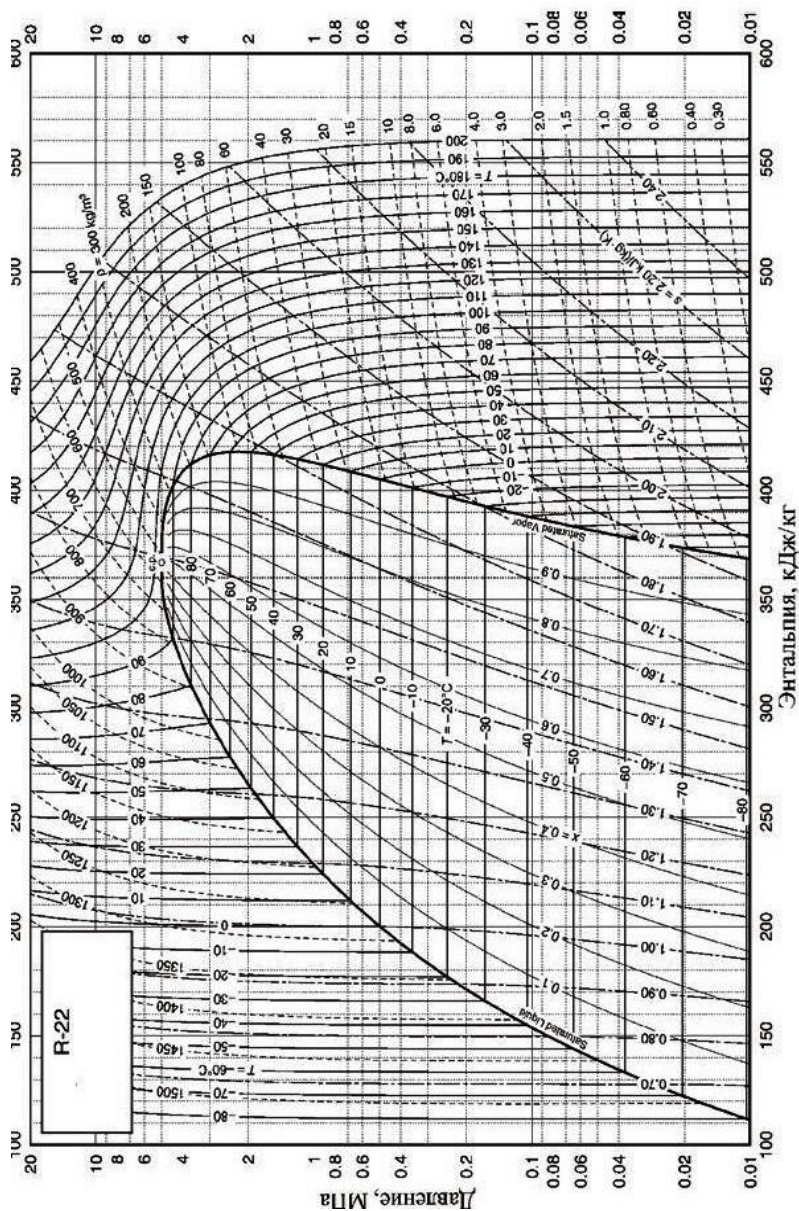


Рис. П1. Диаграмма Мольте.