



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЦЕНТР ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые
процессы»

Учебно-методическое пособие
к лабораторной работе

**«Исследование термодинамического
цикла парокомпрессионной холодильной
установки»**

Авторы
Щербаков В.Н., Полешкин М.С., Мосунов Д.А.



Ростов-на-Дону, 2016



Аннотация

Методические указания содержат основные сведения по работе парокompрессионных холодильных установок и направлены на получение практических навыков в ходе экспериментального исследования характеристик термодинамического цикла холодильной машины.

Пособие рекомендовано студентам 2 и 3 курса очной и заочной форм обучения направления 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» и студентам других направлений, изучающим дисциплины теплотехнического цикла.

Авторы: Доцент, к.т.н. Щербаков В.Н.

Доцент, к.т.н. Полешкин М.С.

Студент Мосунов Д.А.

Рецензент: Доцент, к.т.н. Фридрих Р.А.





Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	4
2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	10
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	12
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	14
РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	15

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Знакомство с теоретическими основами работы парокомпрессионных холодильных установок и получение практических навыков в ходе экспериментального исследования характеристик термодинамического цикла холодильной машины бытового холодильника «Норд».

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Холодильные установки предназначены для охлаждения тел до температуры ниже температуры окружающей среды. Работа холодильной машины связана с переносом теплоты от менее нагретого охлаждаемого тела к более нагретому – окружающей среде. В соответствии со вторым законом термодинамики такой процесс возможен только за счёт затраты внешней энергии.

В парокомпрессионных холодильных установках, получивших широкое распространение благодаря хорошим энергетическим и удельным показателям по габаритным размерам и массе, охлаждение происходит с помощью рабочего тела – холодильного агента (хладагента).

Непрерывная работа холодильной машины осуществляется за счёт кругового термодинамического процесса изменения состояния рабочего тела – обратного термодинамического цикла, для которого справедливо равенство:

$$Q_o + L_u = Q_1, \quad (1)$$

где Q_o – теплота, отводимая от охлаждаемого тела;
 L_u – работа, затраченная на совершение цикла;
 Q_1 – теплота, отдаваемая «горячему источнику» (охлаждающей среде).

Эффективность цикла холодильной установки оценивается холодильным коэффициентом ε :

$$\varepsilon = Q_o / L_u, \quad (2)$$

Термодинамика и теплопередача

$$\varepsilon = Q_o / (Q_1 - Q_o), \quad (3)$$

Важной характеристикой является холодопроизводительность холодильной установки. Она равна количеству теплоты, отбираемой от охлаждаемого объекта в единицу времени и измеряется в Вт.

Рабочий процесс паровой компрессионной машины.

Известно, что в заданном интервале температур обратимый холодильный цикл Карно является наиболее эффективным из всех холодильных циклов и имеет наибольшее значение ε . Обратимый цикл Карно идеальной холодильной машины, осуществляемый в области влажного пара на установке, изображённой на рисунке 1, показан на T - S диаграмме на рисунке 2.

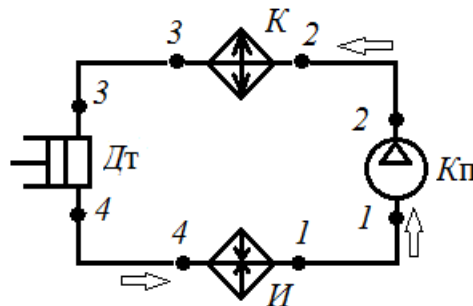


Рис.1. Схема холодильной машины, работающей по обратному циклу Карно.

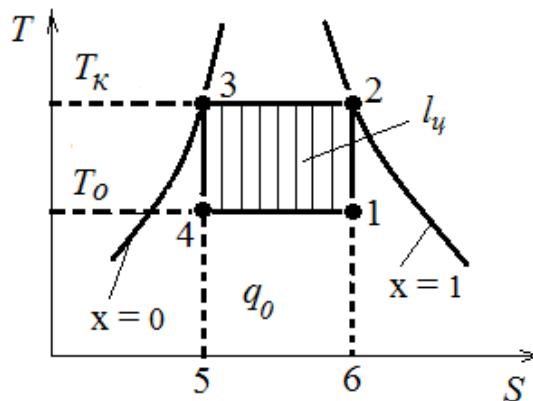


Рис.2. T - S диаграмма цикла Карно.

Термодинамика и теплопередача

Компрессор K_n (Рис.1) сжимает и нагнетает влажный пар в конденсатор K (линия сжатия 1 – 2 на Рис.2). При этом температура пара T повышается от $T = T_1$ до $T = T_2$, давление P – от P_1 до P_2 . В конденсаторе K (Рис.1) пар конденсируется при $T = T_2 = T_k$ (линия 2 – 3 на Рис.2), отдавая охлаждающей среде тепло Q_o и тепло, эквивалентное работе компрессора L_k . В расчётах на 1 кг рабочего тела вместо Q_o , Q_1 , $L_{ц}$, L_k вводят обозначения q_o , q_1 , $l_{ц}$ и l_k соответственно. Расширение хладагента в расширителе (детандере) $Дт$ (Рис.1) по адиабате (3 – 4) (Рис.2) происходит с совершением работы расширения за счёт уменьшения внутренней энергии рабочего тела. На осуществление цикла расходуется энергия, равная разности работ сжатия и расширения. После расширения $T = T_1 = T_o$ и $P = P_1$. При этих параметрах хладагента в испарителе $И$ (рис.1) в процессе 4 – 1 (рис.2) тепло q_o отбирается от охлаждаемого объекта. Затем компрессор сжимает влажный пар по адиабате 1 – 2 и цикл повторяется.

В компрессионных холодильных машинах детандер, работающий на жидком рабочем теле, не используется в связи с трудностью его изготовления. Упрощая конструкцию машин, вместо детандера можно использовать регулируемый дроссельный вентиль. В этом случае обратимый процесс расширения заменяется необратимым процессом дросселирования и уменьшения затрачиваемой работы на величину работы детандера уже не происходит.

В области двухфазных состояний эффект охлаждения при дросселировании такой же, как и при адиабатном процессе расширения. Замена расширительного цилиндра дросселем приводит к возрастанию энтропии и к некоторой потере холодопроизводительности. Однако при помощи дросселя можно легко регулировать давление пара и получать необходимую температуру в охладителе. Потери от дросселирования сокращают за счёт переохлаждения - понижения температуры жидкого хладагента перед дросселем ниже температуры конденсации в специальном теплообменнике или конденсаторе. При этом увеличивается количество отведённой от охлаждаемого объекта теплоты. Линия изобарного процесса переохлаждения практически совпадает с нижней пограничной кривой $x = 0$.

Термодинамика и теплопередача

Увеличить холодопроизводительность машины и улучшить её холодильный коэффициент при использовании хладагентов с небольшим отношением теплоты парообразования к теплоёмкости жидкости позволяет применение регенеративных теплообменников, в которых происходит переохлаждение жидкости, поступающей из конденсатора, за счёт перегрева пара, всасываемого из испарителя. Регенерация не только улучшает энергетические показатели, но и обеспечивает перегрев пара, защищающий компрессор от гидравлического удара, связанного с наличием в цилиндре компрессора жидкой фазы.

Схема паровой компрессионной машины с дросселированием и регенерацией тепла представлена на Рис. 3, на Рис. 4 – $T-S$ диаграмма теоретического цикла.

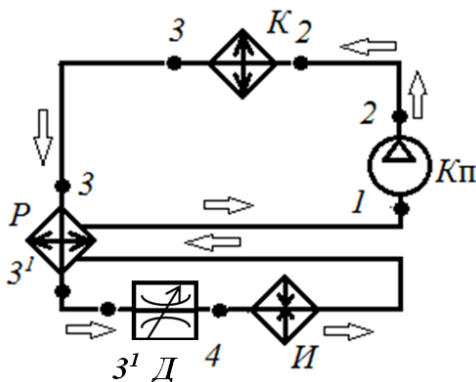


Рис.3. Схема холодильной машины с дросселированием, переохлаждением конденсата и регенерацией тепла.

Наряду с $T-S$ диаграммой при анализе работы и расчётах парокompрессионных машин используют $P-h$ или $lgP-h$ диаграммы, позволяющие определять работу и теплоту в виде отрезков прямых линий.

Термодинамика и теплопередача

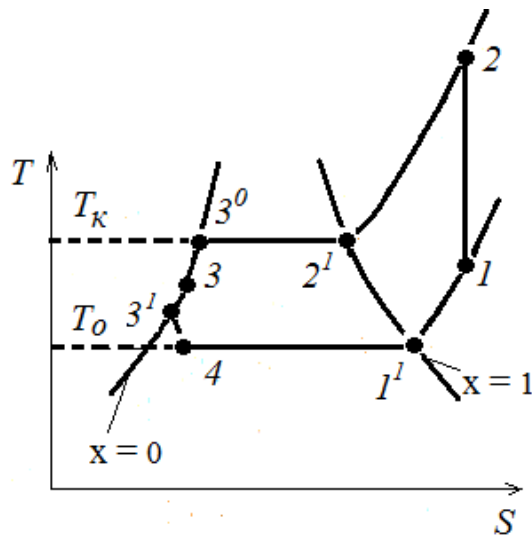


Рис. 4. $T-S$ диаграмма цикла с дросселированием, переохлаждением и регенерацией тепла.

На Рис. 5 представлена $lgP-h$ диаграмма цикла.

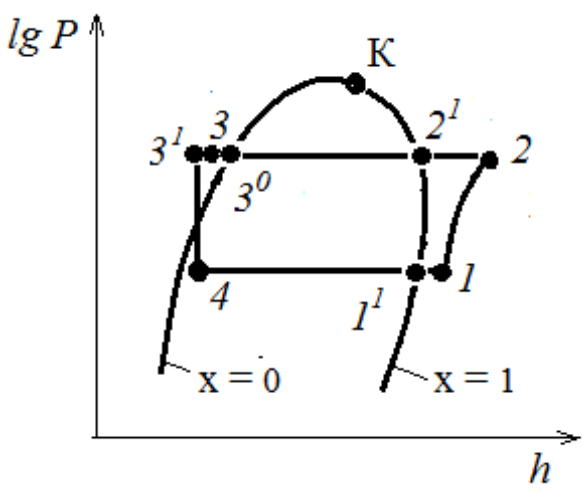


Рис.5. $lgP-h$ диаграмма цикла с дросселированием, переохлаждением и регенерацией тепла.

Термодинамика и теплопередача

В парокомпрессионной установке с регенеративным теплообменником Р (Рис.3) линия адиабатного сжатия 1 – 2 находится в области перегретого пара (Рис.4, Рис.5). Линия охлаждения и конденсации – изобара 2 – 2¹ – 3⁰, причём линия 2 – 2¹ – изобара, линия 2¹ – 3⁰ – одновременно и изобара и изотерма. Линия 3⁰ – 3 – переохлаждение по изобаре в конденсаторе, 3 – 3¹ – переохлаждение по изобаре в регенеративном теплообменнике, 3¹ – 4 – процесс дросселирования в дросселе Д (Рис.3), 4 – 1¹ – кипение хладагента в испарителе (Рис.4, Рис.5), 1¹ – 1 – перегрев пара в испарителе.

Подведённое к хладагенту тепло $q_0 = h_1^1 - h_4$ (Рис. 5). Холодильный коэффициент цикла $\varepsilon = (h_1^1 - h_4) / (h_2 - h_1)$.

При расчёте теоретических циклов считают, что процессы кипения и конденсации хладагента идут при неизменных P и T , компрессор является идеальным (без внешнего теплообмена, потерь на трение, дросселирование, утечек и вредного пространства), процесс сжатия адиабатным, в трубопроводах состояние хладагента не изменяется, понижение давления хладагента при его движении из конденсатора в испаритель происходит в дросселе. Рассматривая показатели действительных циклов, учитывают влияние потерь, связанных с внешней и внутренней необратимостью процессов при работе холодильной машины.

Холодильный коэффициент ε действительного цикла в заданном диапазоне граничных температур T_0 и T_k может быть представлен в следующем виде: $\varepsilon = \varepsilon_k \cdot \eta_0$, где ε_k – это ε для цикла Карно, η_0 – коэффициент совершенства действительного цикла. Внешняя необратимость цикла связана с тем, что процессы теплообмена происходят при наличии разности температур между рабочим телом и источником теплоты. Имеют место нестационарные режимы работы при изменяющейся T , усиливающие внешнюю необратимость. Внутренняя необратимость связана с дросселированием жидкости, с нагревом паров рабочего тела при сжатии, потерями на трение, потерями от необратимости процессов внутреннего теплообмена, нестационарных режимов работы и т.д.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве экспериментального стенда в лабораторной работе использован парокомпрессионный холодильный агрегат бытового холодильника «NORD», схема которого изображена на рисунке 6.

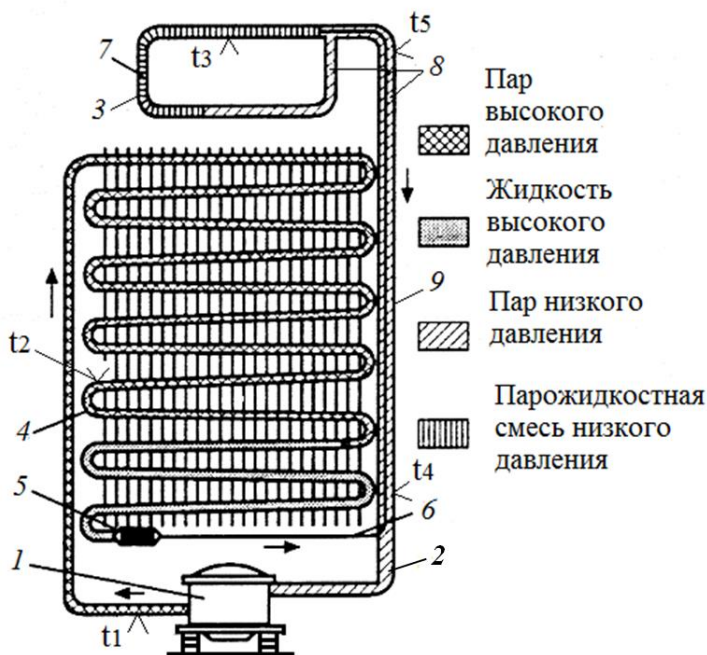


Рис.6. Схема лабораторной установки.

Поршневой мотор-компрессор 1 откачивает пары хладагента 2 марки R 600a из испарителя 3, сжимает их и нагнетает в конденсатор 4, где пары охлаждаются и конденсируются. Жидкий хладагент из конденсатора 4 направляется в фильтр-осушитель 5, заполненный адсорбентом (цеолитом). Фильтр-осушитель служит для удаления влаги из хладагента и защиты длинной капиллярной трубки 6, выполняющей роль дросселя, от засорения твёрдыми частицами. В трубке 6 происходит дросселирование – падение давления хладагента от давления конденсации до давления кипения.

ния. Хладагент вскипает. Образуется парожидкостная смесь 7, которая заполняет часть каналов испарителя 3. Другая часть каналов испарителя 3 заполнена парами 8 полностью испарившегося хладагента. В ходе кипения хладагента в испарителе 3 необходимое для этого процесса тепло отводится от поверхности испарителя за счёт охлаждения воздуха в камере холодильника. Пары хладагента из испарителя 3 откачиваются мотор-компрессором 1 и цикл завершается.

В холодильном агрегате размещён простейший регенеративный теплообменник 9. Жидкий хладагент, проходя через дроссель 6, охлаждается потоками паров 8 из испарителя 3. В свою очередь, хладагент, идущий из испарителя, подогревается за счёт тепла, отведённого от поверхности трубки 6 дросселя до состояния перегретого пара. Мотор-компрессор осуществляет сжатие перегретого пара. Перегрев пара перед сжатием происходит также за счёт тепла, отбираемого паром от нагретых элементов конструкции мотор-компрессора.

На поверхности элементов конструкции холодильного агрегата в различных точках размещены датчики температуры – хромель-копелевые термопары ОВЕН ДТПЛ 011-0.5/1.5, подключённые к многоточечному измерителю-регулятору ОВЕН ТРМ 138-Т, имеющему встроенный интерфейс RS-485. Функциональная схема стенда представлена на рисунке 7.

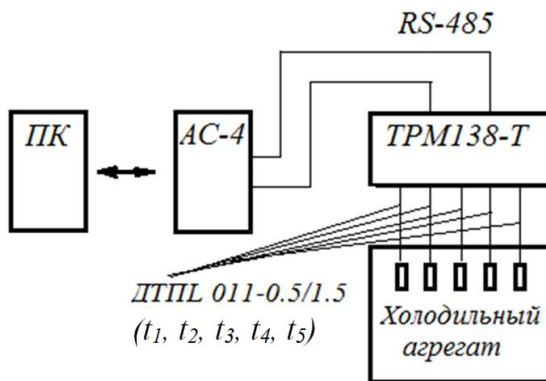


Рис.7. Функциональная схема

Информация от прибора ТРМ-138-Т через адаптер связи АС-4 поступает на персональный компьютер ПК и может быть обработана с целью получения необходимых результатов.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить холодильник, установив поворотом ручки терморегулятора заданный преподавателем температурный режим.

2. Подождать до того момента, когда произойдёт первое автоматическое отключение холодильного агрегата после достижения в камере охлаждения заданной температуры. Произвести измерение температуры t_3 на поверхности испарителя 3 (Рис.6).

3. После автоматического запуска холодильного агрегата периодически измерять температуру t_3 на поверхности испарителя. В тот момент, когда она приблизится к температуре, измеренной в момент отключения холодильника, но холодильный агрегат ещё не отключился, измерить температуру во всех пяти точках на поверхности элементов холодильного агрегата и результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерений

№ опыта	Температура поверхности $t, ^\circ\text{C}$ и номер канала измерения на дисплее ТРМ 138-Т				
	t_1, d_2	t_2, d_1	t_3, d_5	t_4, d_3	t_5, d_4
1					
2					
...					

Повторить измерения п.3 при другом значении t_3 , заданном преподавателем, и занести полученные результаты измерений в таблицу 1. Получить у преподавателя $lgP-h$ диаграммы для двух хладагентов. Зная t_2 (Табл.1), через точку Z^1 на верхней пограничной кривой $x=1$ (Рис.5) провести линию изобары Z^1-Z^0 , совпадающей с изотермой $t=t_2=t_2^1=t_3^0$, и продолжить её до пересечения с изотермой $t=t_1=t_2$ в области перегретого пара, зная t_1 (Табл.1). Имея значения температуры в точке 2 (Рис.5), провести через точку 2 линию адиабаты в сторону уменьшения температуры. Точку 1 находят на пересечении линий адиабаты и изобары 4-

Термодинамика и теплопередача

1, совпадающей в области влажного пара с изотермой. Температуру в точке 1^1 полагают равной температуре поверхности испарителя t_3 (Табл.1). Точку 1^1 находят на пересечении линии 4-1 и верхней пограничной кривой $x=1$. Точку 3^0 находят на пересечении изобары, проведённой через точку 2 и нижней пограничной кривой $x=0$. Значение h в точке 3^1 h_{3^1} находят, полагая, что всё тепло при переохлаждении конденсата в теплообменнике 9 (Рис.6) пошло на перегрев пара и переохлаждения в конденсаторе 4 нет: $h_{3^1} = h_3^0 - \Delta h$, где $\Delta h = h_1 - h_1^1$. Значение t_{3^1} находят на пересечении линии 3^1-4 с линией $x=0$ (Рис.5). Точка 4 определяется по диаграмме на пересечении линий 3^1-4 и 4-1.

4. Полученные значения параметров в характерных точках термодинамического цикла использовать для определения значений $q_0 = h_1^1 - h_4$, $l_k = h_2 - h_1$, $\varepsilon = (h_1^1 - h_4) / (h_2 - h_1)$, степени сухости влажного пара x_4 в точке 4, холодильного коэффициента цикла Карно ε_k .

5. Все полученные результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты определения параметров и характеристик циклов

Марка хладагента	Температура в точках цикла, °C					x_4	q_0 Дж/кг	l_k Дж/кг	ε	ε_k
	t_1	$t_2=t_1$	$t_1^1=t_3=t_3$	$t_2^1=t_3^0=t_2$	t_3^1					
R 600a										
...										

6. Построить термодинамические циклы для двух хладагентов в $T-S$ и $lgP-h$ диаграммах.
7. Сравнить полученные для двух хладагентов значения x_4 , q_0 , l_k , ε и ε_k .
8. Сделать выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему рассматривают обратный цикл Карно при исследовании циклов парокompрессионных холодильных установок?
2. Чем отличаются циклы тепловых двигателей и холодильных парокompрессионных установок?
3. Почему холодильная установка называется парокompрессионной?
4. Что такое холодопроизводительность, работа цикла, работа компрессора, холодильный коэффициент парокompрессионной холодильной установки.
5. Нарисуйте $T-S$ и $lgP-h$ диаграммы цикла Карно парокompрессионной холодильной установки. Расскажите, как работает установка.
6. Нарисуйте $T-S$ и $lgP-h$ диаграммы цикла парокompрессионной холодильной установки с дросселированием и регенерацией теплоты. Расскажите, как работает установка.
7. Почему в парокompрессионных холодильных установках не применяют детандер, заменив его дросселем?
8. Для чего осуществляют переохлаждение конденсата пара в парокompрессионных холодильных установках?
9. С какой целью в парокompрессионной холодильной установке используют теплообменник?
10. В чём заключаются преимущества и недостатки применения метода перегрева паров хладагента перед сжатием в компрессоре?
11. Какие факторы необходимо учитывать при выборе хладагента для парокompрессионной установки ?
12. Каким образом определялись параметры хладагента в основных точках теоретического термодинамического цикла холодильной установки в лабораторной работе?
13. Какая из измеренных на поверхности элементов конструкции холодильного агрегата температур является наиболее близкой к t_3^j ?

Рекомендованная литература

1. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб.для бакалавров / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. - М.: Юрайт, 2011. – 560 с. [Электронный ресурс]<http://www.biblioclub.ru> , доступ с ПК ДГТУ.

2. Термодинамические диаграммы i - lgP для хладагентов / Составитель: ООО «АВИСАНКО». – М.: АВИСАНКО, 2003. – 50 с.

3. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники: учеб.для вузов / В.И. Ляшков. – М.: Высшая школа, 2008. – 320 с.

4. Техническая термодинамика. Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высшая школа, 1981. – 439 с.